
На правах рукописи

Иванова

ИВАНОВА Анастасия Ярославовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
ВОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПГУ
НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И pH**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2019

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Ларин Андрей Борисович**.

Официальные оппоненты:

Зройчиков Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор, АО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», заместитель генерального директора по науке;

Егошина Ольга Вадимовна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники им. М.П. Вукаловича».

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»), г. Москва

Защита состоится « 7 » июня 2019 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Ivanova_A.Ya_.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01



Ледуховский
Григорий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. За последние десять лет энергоблоки с ПГУ занимают первое место в числе вновь установленного теплоэнергетического оборудования ТЭС. Эксплуатационная надежность и безопасность ПГУ определяется, в значительной степени, тремя факторами: схемными и конструктивными решениями, конструкционными материалами и водно-химическим режимом (ВХР). Как правило, проектный ВХР котлов-утилизаторов (КУ) ПГУ – гидразио-аммиачный с фосфатированием (или подщелачиванием) котловой воды. Во всех случаях ВХР реализуется в условиях жестких требований к качеству питательной воды, определяемых производителями котлов-утилизаторов и представленных в рекомендательных документах международной ассоциации по свойствам воды и пара IAPWS и ВТИ. Опыт эксплуатации выявил повышенную повреждаемость ряда элементов котлов-утилизаторов. Снижение повреждаемости возможно заменой гибов труб КУ на трубы из аустенитной стали, но в значительной степени может решаться средствами водно-химического режима. Эксплуатационная надежность ВХР невозможна без качественной системы химико-технологического мониторинга, основанной на автоматических измерениях удельной электропроводности и рН и использующей современные средства обработки информации. Такой подход нашел отражение в нормативном документе СТО ВТИ-2009, разработанном ВТИ и предполагающем измерения удельной электропроводности прямой и Н-катионированной проб (χ и χ_H) во всех основных потоках водного теплоносителя блоков ПГУ. В современных условиях повышение информативности при невысокой стоимости химического контроля стало приоритетной задачей развития теплоэнергетики, в частности, энергоблоков ПГУ.

Степень разработанности темы диссертации. Тема «Совершенствование химического контроля водного теплоносителя на основе измерений электропроводности и рН» разрабатывается с конца прошлого века и представлена в работах ВТИ, МЭИ, ИГЭУ. В ИГЭУ такие работы проводились под руководством профессора Б.М. Ларина и были направлены на развитие СХТМ водоподготовительных установок (Коротков А.Н., Опарин М.Ю.) и традиционных паровых котлов – барабанных и прямоточных (Еремина Н.А., Бушуев Е.Н., Ларин А.Б.). Ими были разработаны расчетные методики для систем автоматического химконтроля (АХК) на основе измерений электропроводности и рН. В диссертации Бушуева Е.Н. разработана обобщенная математическая модель ионных равновесий и предложен новый метод, основанный на измерениях электропроводности и рН охлажденных проб водного теплоносителя. В диссертационной работе Ларина А.Б. предложены и исследованы в лабораторных и промышленных условиях практические алгоритмы нового метода АХК, обеспечивающие широкое применение в теплоэнергетике. Дальнейшее совершенствование нового метода и исследование примене-

ния его в условиях работы блоков ПГУ является актуальной задачей совершенствования ВХР и АХК.

Целью работы является совершенствование методов и средств АХК для систем химико-технологического мониторинга ВХР, отвечающих современным требованиям к качеству водного теплоносителя на энергоблоках ПГУ ТЭС.

Для достижения **поставленной цели** в работе решаются следующие **задачи**:

1. Составить и решить систему уравнений, составляющих математическую модель ионных равновесий в питательной и котловой воде энергоблока ПГУ при отсутствии измерений рН питательной воды и составе примесей котловой воды, характерном для фосфатного и гидратного водно-химических режимов.

2. Разработать методики калибровки лабораторных и щитовых рН-метров в условиях жесткого нормирования рН сверхчистой добавочной и питательной воды котлов-утилизаторов ПГУ.

3. Разработать методики и алгоритмы косвенного (расчетного) определения нормируемых и диагностических показателей химического качества питательной (рН, $[\text{NH}_3]$, $[\text{Na}^+]$, $[\text{Cl}^-]$) и котловой (солесодержание, фосфаты) воды блоков ПГУ, применимые для разработки отечественных анализаторов и систем АХК.

4. Разработать расчетные методики, провести промышленные испытания и дать рекомендации для совершенствования ВХР и химического контроля вспомогательных систем водопользования на ТЭС на основе измерений электропроводности и рН.

Научная новизна работы:

1. На основе теории растворов электролитов составлены и решены системы уравнений, описывающих ионные равновесия в водном теплоносителе энергоблоков с ПГУ, преобразованием уравнений получены аналитические зависимости, позволяющие определить значения ряда нормируемых и диагностических параметров ВХР по измерениям электропроводности охлажденных прямой и Н-катионированной проб (χ и χ_{H}), отличающиеся учетом особенностей конструкции и водного режима котлов-утилизаторов ПГУ и адаптированные для фосфатного и гидратного ВХР.

2. Разработаны методики косвенного определения рН для малобуферных предельно разбавленных водных растворов, характерных для теплоносителя блоков ПГУ, что обеспечило возможность контроля рН только по измерениям удельной электропроводности охлажденных проб и возможность калибровки штатных рН-метров непосредственно в производственных условиях.

3. Разработан алгоритм расчета для отечественного анализатора нового поколения «Лидер-АПК», применимого для автоматического химконтроля охлажденных проб воды и пара энергоблоков ПГУ и отличающегося от им-

портных аналогов увеличенным рабочим диапазоном рН (от 6,0 до 10,0 ед. рН) и объемом выходной информации.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели фосфатного водно-химического режима блоков ПГУ, составлении расчетной методики и алгоритма определения рН теплоносителя по измерениям электропроводности охлажденных проб питательной воды, методики калибровки рН-метров в сверхчистых средах типа конденсата.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанные методики и алгоритмы могут использоваться при проектировании и эксплуатации систем АХК на ТЭС с блоками ПГУ.

2. На лабораторном стенде с использованием модельных монорастворов и растворов смеси электролитов получены результаты исследований для проверки зависимостей, положенных в основу расчетных методик, в том числе анализатора «Лидер-АПК», для отработки методики калибровки рН-метров в условиях сверхчистой воды типа конденсата паровых турбин; получены патенты на соответствующие способы и устройства, применимые в теплоэнергетике.

3. Проведена промышленная апробация разработанных методик, способов и устройств химического контроля ВХР блоков ПГУ на Ивановских ПГУ, Северо-Западной ТЭЦ г. С.-Петербурга, Минской ТЭЦ-5 и др. Показано, что косвенное (расчетное) определение таких показателей, как рН и концентрации аммиака, содержания и концентрации фосфатов по измерению удельной электропроводности охлажденных проб может выполняться в пределах 10%-ого отклонения от аналитически измеренных значений.

4. Разработанный способ измерения рН малобуферных вод типа конденсата и реализующее его устройство – анализатор «Лидер-АПК», – были оценены «Золотой медалью» на международном инновационном салоне в Женеве в 2017 году.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методики и расчетные алгоритмы косвенных измерений ряда нормируемых параметров ВХР ПГУ (рН, концентрации аммиака, хлоридов, натрия (условного) и др.), основанные на измерениях электропроводности (в ряде случаев с использованием измерений рН) охлажденных проб питательной и котловой воды.

2. Результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний методик, способов и устройств, основанных на измерениях электропроводности и предназначенных для автоматизированного химического контроля технологических потоков блоков ПГУ.

3. Способ измерения рН малобуферных вод типа конденсата, устройство калибровки рН-метров для контроля сверхчистого водного теплоносителя блоков ПГУ.

Степень достоверности полученных результатов подтверждаются использованием апробированных методов и программных средств моделирования химических процессов теплоэнергетического оборудования; проведением экспериментальных исследований в условиях промышленной эксплуатации теплоэнергетических объектов с использованием стандартизированных методов и средств измерения параметров; совпадением в пределах погрешности экспериментальных данных и результатов расчета показателей работы исследуемых объектов; согласованностью результатов диссертационной работы с опубликованными данными других авторов.

Методология и методы исследования определяются целью и задачами работы, сложившимися научными подходами и направлены на совершенствование химического контроля водного теплоносителя на энергоблоках ПГУ ТЭС. По существу, методология состоит в разработке расчетно-аналитического метода, основанного на наиболее достоверных и воспроизводимых для предельно-разбавленных водных растворов смеси электролитов приборных измерениях электропроводности и рН в сочетании с расчетными методиками для ионных равновесий водных растворов, адаптированных для питательной, котловой воды и конденсата пара энергоблоков ПГУ.

Личный вклад автора в получение результатов работы состоит в разработке расчетных методик, алгоритмов; непосредственном участии в лабораторных исследованиях и промышленных испытаниях по совершенствованию химического контроля водного теплоносителя энергоблоков ПГУ ТЭС, включая расчет рН и концентраций ионных примесей питательной и котловой воды, разработку расчетного алгоритма анализатора «Лидер-АПК», методики калибровки промышленных рН-метров в условиях сверхчистой среды; подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»: **в части формулы специальности:** «проблемы совершенствования действующих и обоснования новых ... систем...водоподготовки; ... вопросы ... водных режимов..., проблемы обеспечения надежности... оборудования тепловой электростанции, её систем»; **в части области исследования специальности** – пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета... и оптимизации параметров, показателей качества ... систем»; – пункту 2: «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах ...»; – пункту 3: «... исследование, совершенствование действующих ... технологий ... использования ... водных и химических режимов ...»; – пункту 5: «Повышение надежности и рабочего ресурса агрегатов, систем»; пункту 6: «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования ...».

Апробация работы. Результаты работы представлены на международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Энергия» (ИГЭУ, г. Иваново, 2013–2015 гг., 2017-2018 гг.), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2014-2017 гг.); на международных молодежных конференциях «Гинчуринские чтения» (КГЭУ, г. Казань, 2013-2015 гг.); на Всероссийском форуме «Наука и инновации в технических университетах» (СПбГПУ, г. С.-Петербург, 2013-2014 гг.); на конференции молодых ученых ИГЭУ «Энергия инновации» (ИГЭУ, г. Иваново, 2013-2014 гг.); Национальном конгрессе по энергетике (Казань, КГЭУ, 2014 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсо-энергосбережение и экологическая безопасность промышленных городов» (Филиал МЭИ, г. Волжский, 2014); на Всероссийской школе-семинар «Коммерциализация научно-технических идей в энергетике» (МЦ «Решма», Иваново, 2014 г.); международных конференциях «Бенардосовские чтения» (Иваново, ИГЭУ, 2015 г., 2017г.); в сборнике научных трудов «Наука. Технологии. Инновации» (НГТУ, г. Новосибирск, 2015 г.); на межотраслевой научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике (Атомэнергоаналитика)» (г. Сосновый Бор, 2017 г.); на международной конференции «ВПУ и ВХР ТЭС» (Москва, ОАО «ВТИ» 2017 г.); на научно-практической конференции «Теоретические и практические вопросы применения приборов контроля ВХР в энергетике» (г. Нижний-Новгород, ООО «ВЗОР», 2015 г., 2017 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 34 печатных работы, в том числе, 5 статей в изданиях по перечню ВАК, 2 патента на изобретение и 1 патент на полезную модель, 26 тезисов и полных текстов докладов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 163 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований и 13 приложений. Основной текст объемом 114 страниц содержит 25 рисунков и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены актуальность работы, дана ее общая характеристика, определены цель и задачи, указана научная новизна и практическая значимость.

В первой главе в качестве предмета исследования приняты к рассмотрению системы обеспечения водно-химических режимов новых энергоблоков с ПГУ. Анализ состояния ВХР и систем его обеспечения показывает, что проблемы эксплуатации энергетических котлов, связанные с водным режимом, связаны с переходом на другой, отличный от проектного, водно-химический режим. В ряде случаев встает задача обеспечения жестких нормативных тре-

бований к качеству питательной воды и пара. В регламенте СТО ВТИ-2009, дублирующем европейские нормы, увеличивается объем химического контроля для всех котлов ПГУ и вводятся новые показатели, в частности, ТОС – общий органический углерод, концентрации хлоридов и сульфатов в питательной воде.

Для решения проблемы контроля состояния и ведения ВХР ПГУ требуется СХТМ и приборы АХК нового поколения, основу которых составляют отечественные разработки и методики определения основных нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя.

Во второй главе представлен методический подход к решению задач исследования. Подход состоит в разработке лабораторных стендов и методик лабораторных исследований и промышленных испытаний, с целью определения граничных условий и параметров расчетных методик и алгоритмов, приемлемых для практических условий эксплуатации ВХР ПГУ.

В лаборатории кафедры ХХТЭ ИГЭУ при непосредственном участии автора разработан лабораторный стенд «Установка обратного осмоса и химического обессоливания».

В данной работе впервые обоснована система уравнений для фосфатного ВХР блока ПГУ и решена система уравнений на основе предыдущих исследований – для гидратного водно-химического режима.

Преобразованная система уравнений ионных равновесий для котловой воды при гидратном ВХР будет иметь вид:

$$[\text{Cl}^-] = 2,38 \cdot 10^{-6} \cdot \chi_{\text{H}} \quad (1)$$

$$[\text{Cl}^-]_{\text{нг}} \cdot (1 + 0,19 \cdot 10^{11-p\text{H}}) \cdot [\text{CO}_3^{2-}] = [\text{Cl}^-] \cdot 0,5 \cdot (1 + q) \cdot [\text{HCO}_3^-]_{\text{нг}} \quad (2)$$

$$[\text{NH}_4^+] + [\text{Na}^+] = 10^{p\text{H}-14} + [\text{Cl}^-] + (2 + 0,19 \cdot 10^{11-p\text{H}}) \cdot [\text{CO}_3^{2-}] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \chi \cdot 10^{-6} = & 0,0736 \cdot [\text{NH}_4^+] + 0,0501 \cdot [\text{Na}^+] + 0,1983 \cdot 10^{p\text{H}-14} + \\ & + 0,0764 \cdot [\text{Cl}^-] + (0,139 + 0,0085 \cdot 10^{11-p\text{H}}) \cdot [\text{CO}_3^{2-}] \end{aligned} \quad (4)$$

$$[\text{NH}_4^+] = \frac{1,035 \cdot 10^{-7} \cdot p \cdot [\text{NH}_3]_{\text{нг}}}{(1,76 + 10^{p\text{H}-9})} \quad (5)$$

где, χ , χ_{H} – удельная электропроводность охлажденных прямой и Н-катионированной пробы котловой воды, мкСм/см; $[\text{Cl}^-]$, $[\text{CO}_3^{2-}]$, $[\text{NH}_4^+]$, $[\text{Na}^+]$ – концентрации ионов в котловой воде, моль/дм³; $[\text{Cl}^-]_{\text{нг}}$, $[\text{HCO}_3^-]_{\text{нг}}$ – концентрации хлоридов и гидрокарбонатов в питательной воде, моль/дм³; рН – значение рН котловой воды при 25 °С; q – доля гидрокарбонатов, ушедших в пар в виде CO₂; p = 0,1 ÷ 0,2 – доля концентрации аммиака питательной воды $[\text{NH}_3]_{\text{нг}}$, мкг/дм³, оставшаяся в котловой воде.

В основу расчетного метода, разработанного автором, положены инструментальные измерения электропроводности и рН, рекомендованные СТО

ВТИ-2009. Возможность частных решений при минимальном числе измеряемых величин, как правило, удельной электропроводности прямой (χ^{25}) и Н-катионированной пробы (χ_{H}^{25}) и рН²⁵, при их совместном или индивидуальном использовании обеспечена преобразованием общей системы уравнений с объединением концентраций катионов в концентрацию натрия (условную), анионов сильных кислот в концентрацию хлорид ионов и введением эмпирических параметров. Принятые условия обеспечивают косвенное определение концентрации нормируемых примесей, как правило, в пределах 10%-го отклонения от аналитически измеряемых величин.

Третья глава посвящена разработке методик химического контроля качества водного теплоносителя энергоблоков ПГУ по измерениям электропроводности для питательной воды, электропроводности и рН – для котловой воды котлов-утилизаторов (КУ).

Для добавочной и питательной воды блоков ПГУ рассматриваются три варианта методики косвенного определения рН и концентрации аммиака. Варианты методики отличаются способами решения системы уравнений, описывающих ионные равновесия, и перечнем вводимых допущений.

Первый вариант расчетной методики предполагает анализ ионных равновесий питательной воды при отсутствии солевых примесей, когда в воде есть только угольная кислота и аммиак. Рассматриваются ионные равновесия как в фильтрате Н-катионитовой колонки, так и в пробе воды до Н-колонки.

Расчетная система состоит из пяти уравнений (6)÷(10) и содержит пять неизвестных величин (не считая χ и χ_{H}) и имеет одно решение.

- уравнение электронейтральности для анализируемой воды:

$$[\text{NH}_4^+] = [\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]; \quad (6)$$

- балансовое уравнение форм состояния углекислоты:

$$[\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] = [\text{H}_2\text{CO}_3]_{\text{H}} + [\text{HCO}_3^-]_{\text{H}} = A; \quad (7)$$

- уравнения, описывающие диссоциацию слабых электролитов в анализируемой воде:

а) гидрокарбоната:

$$K_{\text{H}} = 4,8 \cdot 10^{-11} = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}; \quad (8)$$

б) воды:

$$K_{\text{w}} = 1 \cdot 10^{-14} = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-]; \quad (9)$$

- уравнение электропроводности для анализируемой воды:

$$\chi \cdot 10^{-3} = 73,6 \cdot [\text{NH}_4^+] + 198,3 \cdot [\text{OH}^-] + 44,5 \cdot [\text{HCO}_3^-] + 2 \cdot 69,3 \cdot [\text{CO}_3^{2-}], \quad (10)$$

Недостатком является большое различие числовых значений определяемых величин, например $[\text{H}^+] = 1 \cdot 10^{-9}$ при $[\text{NH}_4^+] = 1 \cdot 10^{-5}$, что может создавать значительные ошибки в определении рН или выводить решение за пре-

дела допустимых значений, например, получение отрицательных значений концентраций.

Второй вариант повторяет исходные данные первого варианта (угольная кислота и аммиак), но использует итерационный метод решения системы уравнений (6)÷(10) с начальным заданием приближенного значения pH в диапазоне от 8,5 до 9,5, что обычно имеет место для питательной воды ПГУ. Такой вариант привлекает простотой решения задачи и может использоваться в промышленных системах АХК, однако, работает в небольшой области изменений pH.

Третий вариант (оценочный метод) предполагает упрощение задачи путем исключения из исходных данных концентрации угольной кислоты: в абсолютно чистой воде растворен только NH_4OH . Тогда достаточно одного измерения удельной электропроводности (χ) без Н-колонки. Этот вариант может служить оценкой измеряемых значений pH в условиях сверхчистой питательной воды прямоточных котлов СКД и ССКП, однако вряд ли пригоден для промышленных систем с ПГУ.

В табл. 1 приведены результаты измеренных и расчетных значений по трем вариантам расчетной методики.

При больших дозировках NH_3 (больше 100 мкг/дм³) результаты расчета pH достоверны в пределах паспортной ошибки измерения прибора pH-метра по каждому из трех вариантов. Концентрации NH_3 отличаются на 5-10 % от аналитически измеренных значений.

Таблица 1. Результаты измеренных и расчетных значений pH и концентрации аммиака в питательной воде парового котла на энергетическом предприятии

Точки контроля*	Исходные данные		Результаты измерений		Результаты расчета					
	χ , мкСм/см	$\chi_{\text{н}}$, мкСм/см	pH	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
					pH	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³	pH	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³	pH	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³
1	4,6	0,225	9,22	587	9,21	559	9,19	564	9,23	564
	4,13	0,238	9,17	499	9,16	481	9,14	445	9,18	481
2	8,04	0,19	9,47	1400	9,46	1303	9,46	1306	9,47	1348
	0,196	0,187	7,62	-	7,44	22	7,47	22	7,86	13
3	0,453	0,212	8,16	-	7,76	31	8,06	42	8,22	32
	0,686	0,108	8,09	-	8,37	53	8,37	53	8,4	49

*1 – Петрозаводская ТЭЦ; 2 – Северо-Западная ТЭЦ; 3 – Конаковская ГРЭС; 4 – Костромская ГРЭС

При малых дозировках NH_3 (табл. 1, п.3,4) приближенные методы расчета могут давать отклонение значений pH от измеренных, превышающих паспортную ошибку прибора $\pm 0,05$.

Автором предлагается иная методика расчета ионных примесей питательной воды, основанная лишь на измерениях удельной электропроводности охлажденных прямой и Н-катионированной проб питательной воды энергетических котлов, включая котлы-утилизаторы ПГУ. В диссертационной рабо-

те приведены результаты теоретического анализа ионных равновесий в питательной воде и представлен расчетный алгоритм, применимый для широкого круга задач автоматического химического контроля качества водного теплоносителя современных энергоблоков ТЭС, включая блоки ПГУ.

Результаты расчета по представленному алгоритму значений рН и концентрации аммиака $[\text{NH}_3]$ при удельной электропроводности пробы 2,5 мкСм/см приведены на рис. 1 и рис. 2. Из рис. 1 видно, что при увеличении удельной электропроводности Н-катионированной пробы от 0,1 мкСм/см до 1,0 мкСм/см снижение рН находится в пределах 0,2 единицы при всех значениях «n», тогда как увеличение χ_{H} до 1,5 мкСм/см влечет резкое уменьшение рН от 8,8 до 7,35 при значении $n = 1,5$. Изменение концентрации аммиака при этом имеет более равномерный характер, увеличиваясь от 240 мкг/дм³ при $\chi_{\text{H}} = 0,1$ мкСм/см (и любых «n») до 364 мкг/дм³ при $\chi_{\text{H}} = 1,5$ мкСм/см и $n = 1,5$; $n = [\text{HCO}_3^-]_{\text{H}}/[\text{Cl}^-]_{\text{H}} = 0,1 \div 2,0$ – отношение концентрации гидрокарбонатов и хлоридов в фильтрате Н-колонки, также определяемое условиями ее работы.

Рис. 1. Расчетная зависимость рН предельно разбавленного водного раствора с удельной электропроводностью 2,5 мкСм/см

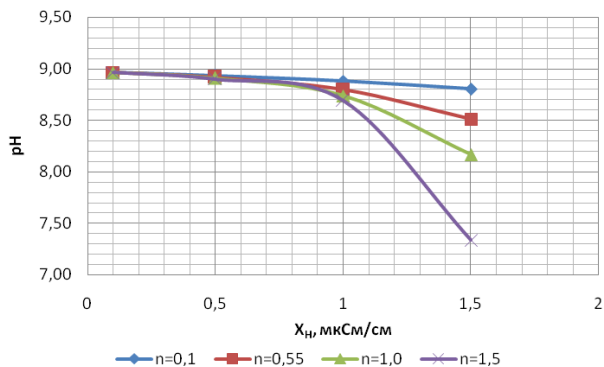
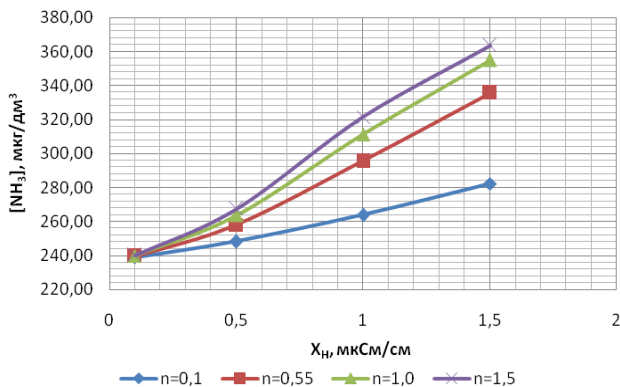


Рис. 2. Расчетная зависимость концентрации аммиака предельно разбавленного водного раствора с удельной электропроводностью 2,5 мкСм/см



Проведенные расчеты показывают, что для сверхчистых сред питательной воды энергоблоков ТЭС, включая блоки ПГУ, провал значений рН в коррозионно опасную область ($pH < 8,0$) может происходить даже в условиях существенных дозировок аммиака (более 250 мкг/дм^3) при увеличении концентрации уголекислоты, например, вследствие ухудшения работы деаэратора питательной воды (пример, ГТЭС «Терешково» г. Москва).

Использование методики для расчета рН и концентраций ионных примесей питательной воды энергоблоков различных ТЭС приведено в табл. 2 и подтверждает возможность ее применения для анализа качества ВХР как для ПГУ (ГТЭС «Терешково», С.-Западная ТЭЦ), так и для традиционных паровых котлов (Петрозаводская ТЭЦ, Конаковская ГРЭС). Данные табл. 2 показывают возможность подбора установочных значений параметра «n».

Таблица 2. Результаты измерений и расчета нормируемых и диагностических показателей качества питательной воды

	n*	Измеренные данные				Расчетные данные			
		χ мкСм/см	χ_n мкСм/см	pH	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³	pH	$[\text{Cl}]$, мкг/дм ³	$[\text{HCO}_3^-]$, мкг/дм ³	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³
ГТЭС Терешково	1,0	3,77	0,221	9,13	-	9,14	0,27	0,58	426,13
	1,5					9,13	0,22	0,70	427,17
Петрозаводская ТЭЦ	0,55	4,6	0,225	9,22	587	9,23	0,35	0,42	564,90
	1,0					9,22	0,27	0,59	566,52
Северо-Западная ТЭЦ	0,55	8,04	0,19	9,47	1400	9,47	0,30	0,32	1328,72
	1,0					9,47	0,23	0,46	1330,24
Конаковская ГРЭС	0,55	0,196	0,187	7,62	-	7,64	0,29	0,30	18,16
	0,1					7,62	0,23	0,43	18,98
	0,1					8,15	0,46	0,09	35,64

* - лабораторные и промышленные исследования позволяют определить значение параметра «n» в следующих диапазонах: для прямоточных котлов СКД $n = 0,1 \div 0,5$; для барабанных котлов ($p_6 > 10 \text{ МПа}$) и котлов-утилизаторов ПГУ ($p_6 > 7 \text{ МПа}$) $n = 0,5 \div 1,0$; барабанных котлов-утилизаторов ПГУ с $p_6 < 7 \text{ МПа}$ и глубоко обессоленной воды $n = 0,9 \div 1,5$, котлов-утилизаторов ПГУ с $p_6 > 7 \text{ МПа}$ $n = 0,5 \div 1,0$.

Таким образом, принятая методика позволяет по измеренным и приведенным к $25 \text{ }^\circ\text{C}$ значениям удельной электропроводности (χ и χ_n) охлажденных проб питательной воды энергетических котлов производить косвенные (расчетные) измерения концентраций хлоридов, гидрокарбонатов, аммиака и значения рН, что обеспечивает возможность автоматического химического контроля и управления водным режимом современных энергоблоков в широком диапазоне изменения параметров и концентраций ионов, в том числе, связанной уголекислоты.

Применение метода ИГЭУ для контроля фосфатного водно-химического режима КУ блоков ПГУ дано на основе математического описания ионных равновесий в котловой воде парового котла ($p_6 > 10 \text{ МПа}$). Особенностью решения в данном случае является учет неполноты выноса в пар аммиака, поступившего в барабан КУ с питательной водой при отсутствии солевого отсека:

$$[\text{NH}_4^+] + [\text{Na}^+] = [\text{OH}^-] + 2[\text{HPO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] + (2 + 0,19 \cdot 10^{11-pH}) \cdot [\text{CO}_3^{2-}]; \quad (11)$$

$$[\text{OH}^-] = b[\text{HPO}_4^{2-}] + 0,19 \cdot 10^{11-pH} \cdot [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{NH}_4^+]; \quad (12)$$

$$\chi \cdot 10^{-6} = 0,0736 \cdot [\text{NH}_4^+] + 0,050 \cdot [\text{Na}^+] + 0,1983 \cdot [\text{OH}^-] + 0,057 \cdot [\text{HPO}_4^{2-}] + 0,0764 \cdot [\text{Cl}^-] + (0,1386 + 0,0085 \cdot 10^{11-pH}) \cdot [\text{CO}_3^{2-}]; \quad (13)$$

$$\chi_H \cdot 10^{-6} = 0,4261 \cdot [\text{Cl}^-] + 0,386 \cdot [\text{HPO}_4^{2-}] \text{ при } [\text{H}_2\text{PO}_4^-] = [\text{HPO}_4^{2-}]; \quad (14)$$

$$(1 + 0,19 \cdot 10^{11-pH}) \cdot [\text{CO}_3^{2-}] = [\text{Cl}^-] \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{ПВ}}}{2 \cdot [\text{Cl}^-]_{\text{ПВ}}}; \quad (15)$$

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

где $p = 0,0 \div 0,2$ – доля концентрации аммиака питательной воды, оставшаяся в котловой воде; $[\text{Cl}^-] = K_K \cdot [\text{Cl}^-]_{\text{ПВ}}$ при первичном задании значение $K_K = 5$; $[\text{Cl}^-]_{\text{ПВ}}$, $[\text{HCO}_3^-]_{\text{ПВ}}$, $[\text{NH}_3]_{\text{ПВ}}$ – определяются по методике расчета ионных равновесий в питательной воде, при $p = 0,55$ для блоков ПГУ с $p_6 > 7$ МПа и $p = 0,9$ для блоков ПГУ с $p_6 < 7$ МПа и деаэрацией питательной воды в атмосферных деаэраторах.

Разработанные алгоритмы использованы для определения расчетных зависимостей ряда нормируемых параметров ВХР ПГУ по измеренным значениям χ , χ_H для питательной и котловой воды.

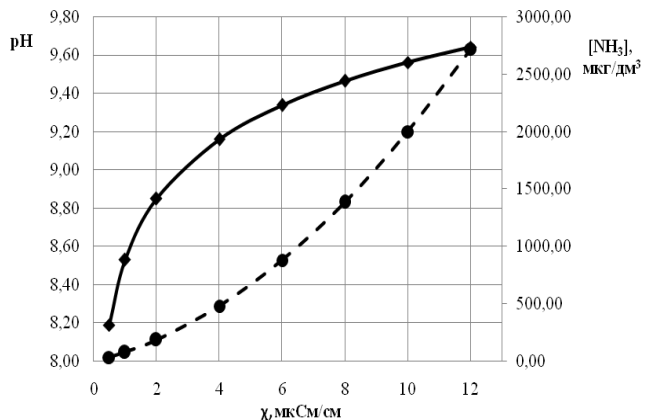


Рис. 3. Расчетная зависимость pH (—) и $[\text{NH}_3]$ (---) от удельной электропроводности питательной воды (при $\chi_{\text{н.пв}} = 0,2$ мкСм/см)

Из рис. 3 видно, что рекомендуемые СТО ВТИ-2009 значения pH питательной воды КУ блока ПГУ в диапазоне 9,2-9,6 могут быть обеспечены дозировками аммиака более 1000 мг/дм³ при значениях удельной электропроводности охлажденных проб от 4 мкСм/см до 10 мкСм/см в условиях высокой чистоты питательной воды ($\chi_H < 0,2$ мкСм/см).

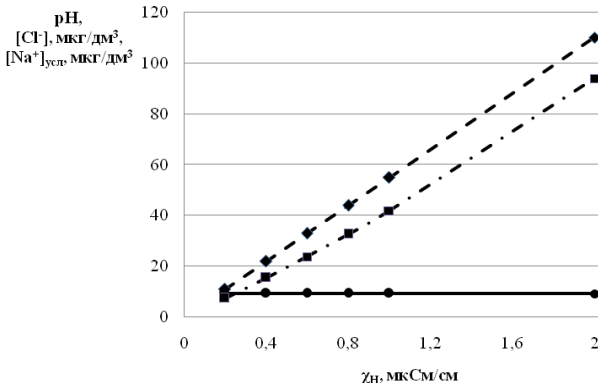


Рис. 4. Расчетная зависимость рН (—) и концентраций [Na⁺] (- · -) и [Cl⁻] (- - -) от изменений χ_H ($\chi = 8,0$ мкСм/см, [NH₃] = 1375 кг/дм³)

Из рис. 5 следует, что при высоких значениях рН и дозировках NH₃ изменение солесодержания питательной воды определяется только значением χ_H .

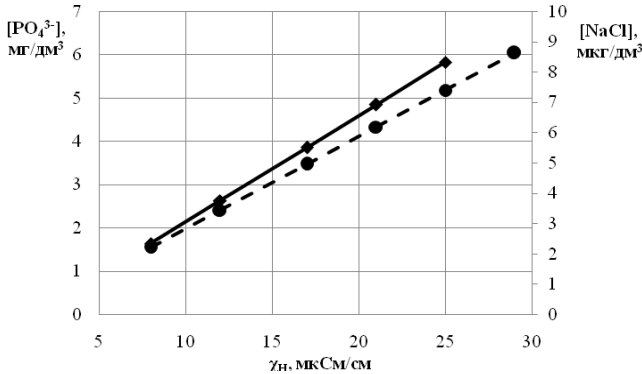


Рис. 5. Расчетная зависимость [PO₄³⁻] (—) и [NaCl] (- - -) от изменений χ_H котловой воды (при $\chi_{H,пл} = 0,2$ мкСм/см)

Из рис. 5 видно, что нормативные значения концентрации фосфатов в котловой воде до 2 мг/дм³ отвечают значениям удельной электропроводности χ_H в пределах 10÷12 мкСм/см.

Оценка достоверности расчетных значений параметров гидратного ВХР ПГУ по измерениям χ , χ_H выполнена по результатам химического контроля на действующих энергоблоках ПГУ (табл. 2).

Для прямых измерений показателя рН в условиях сверхчистой добавочной питательной воды и конденсата пара на блоках ПГУ автором разработана методика калибровки рН-метров непосредственно в условиях рабочей среды с дозированием реагентов, не изменяющих существенно характер этой среды. Для этого был использован стенд мембранно-ионообменной технологии, позволяющий получить обессоленную воду с удельной электропроводностью $\chi = 0,08 \div 0,10$ мкСм/см. Для обеспечения калибровки рН-метра в диапазоне рН = 6,0 ÷ 10,0 при изменении электропроводности пробы от 0,1 до

10,0 мкСм/см исследовались растворы аммиака, аммиака в смеси с хлоридом аммония, гидрокарбоната натрия и смеси гидрокарбоната натрия с угольной кислотой. Калибровочный раствор дозировался в поток пробы обессоленной воды и поступал на датчик рН-метра. Параллельно рН-метру проба воды поступала на анализатор «Лидер-АПК» (рис. 6). Часть опытов проводилась в статических условиях контакта с воздухом с использованием лабораторных кондуктометров и рН-метров. Результаты опытов при дозировке в глубоко-обессоленную воду аммиака приведены на рис. 7 и 8.

Рис. 6. Схема установки для калибровки «АПК-Лидер» по рН:
1 – бак с калибровочным раствором;
2 – микронасос – дозатор;
3,4 – краны.

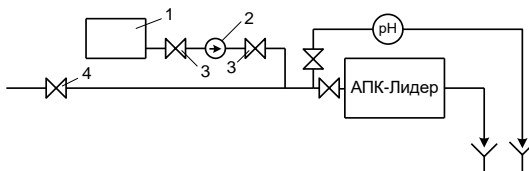
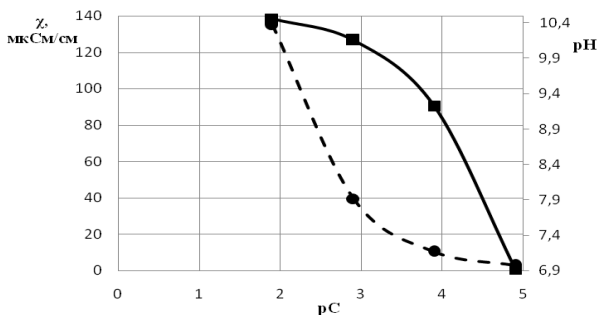
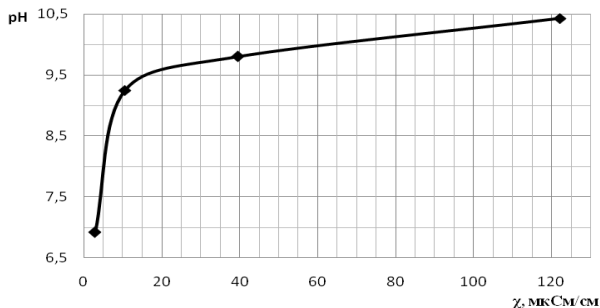


Рис. 7. Зависимость удельной электропроводности (χ) (—) и рН (---) раствора аммиака от концентрации ($pC = -\lg[NH_3]$) при температуре 25 °С и контакте пробы с воздухом



Из рис. 7 видно, что при дозировании аммиака в чистую воду в концентрации $10^{-4} \div 10^{-5}$ моль/дм³ (1700 ÷ 170 мкг/дм³), т.е. при $pC = -\lg C_{NH_3} = 4 \div 5$, рН раствора изменяется значительно при малом изменении χ . Такой вывод наглядно иллюстрируется на рис. 8, что показывает невозможность калибровки рН-метров растворами аммиака (в том числе аммиачными буферными растворами) в предельно разбавленных водных средах с электрической проводимостью менее 10 мкСм/см при контакте с воздухом.

Рис. 8. Зависимость рН от χ раствора при концентрации аммиака от $1,25 \cdot 10^{-5}$ М до $1,25 \cdot 10^{-2}$ М



Проведение опытов на стенде при отсутствии контакта с воздухом и при проточке пробы обессоленной воды с малыми дозировками аммиака показало следующее. Минимальные количества минеральных примесей и углекислоты в пробе, что отвечает $\chi_H < 0,5$ мкСм/см, уменьшают свое влияние на рН с ростом дозировки аммиака (соответственно с ростом χ пробы) и практически перестают влиять на результат измерения рН при $\chi > 4$ мкСм/см и $\text{pH} > 9,15$ (рис. 9). Проверка показала, что в этом случае значение рН достаточно надежно рассчитывается уравнением (17):

$$\text{pH} = -\lg(2,72 \cdot 10^{-9} / \chi), \quad (17)$$

а концентрация аммиака (мкг/дм³) уравнением (18):

$$[\text{NH}_3] = 62,6 \cdot \chi + 13,1 \cdot \chi^2. \quad (18)$$

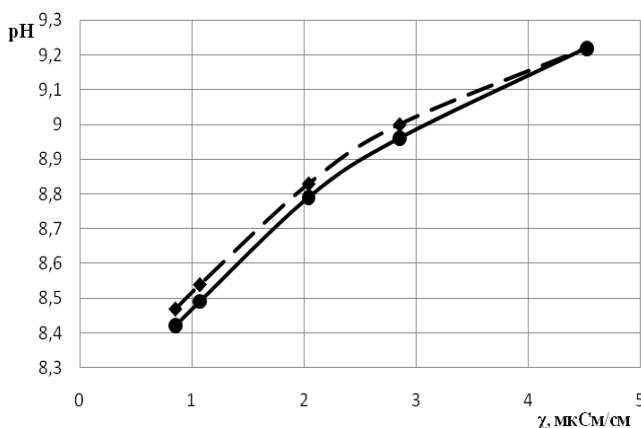


Рис. 9. Зависимость рН глубоко обессоленной воды ($\chi_H < 0,5$ мкСм/см) от удельной электропроводности при дозировках аммиака:
 — с учетом минерализации и углекислоты;
 - - - без учета минерализации и углекислоты

Для калибровки рН-метра вблизи нижней границы измерений, принятой за 6,0, можно использовать углекислотный буферный раствор, содержащий NaHCO_3 , H_2CO_3 , NaCl в соотношении 1:1:1.

В четвертой главе описаны способы и устройства для реализации расчетных методик качества водного теплоносителя блоков ПГУ на основе измерений электропроводности и рН. Методики косвенных измерений рН и концентраций ионных примесей в водном теплоносителе использованы автором (или с участием автора) в ряде технических и технологических решений, применимых в теплоэнергетике.

Разработано устройство калибровки рН-метров (рис. 10), как лабораторных, так и щитовых, в рабочем диапазоне рН от 6,0 до 10,0, производящих измерения на потоках конденсатов, обессоленной и питательной воды энергоблоков с удельной электропроводностью Н-катионированной пробы от 0,056 до 0,5 мкСм/см (приведенной к 25 °С). Устройство реализует способ калибровки рН-метров, изложенный в третьей главе.

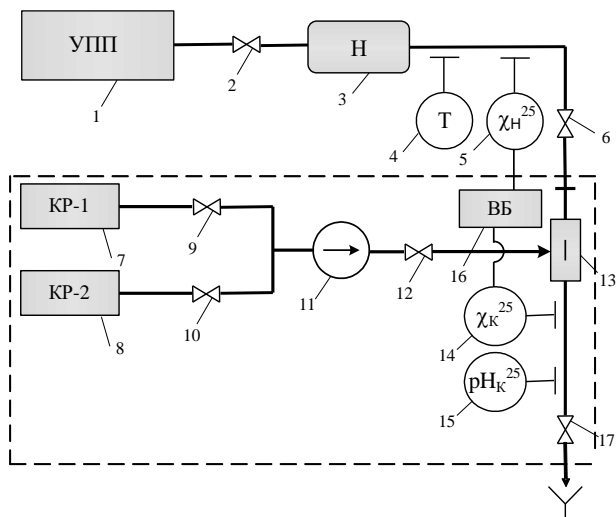


Рис. 10. Устройство калибровки рН-метров:

1 – устройство подготовки пробы, 2 – кран для регулирования расхода пробы рабочей среды, 3 – Н-катионитная колонка, 4 – датчик температуры, 5 – датчик электропроводности ($\chi_{Н}^{25}$), 6 – задвижка, 7, 8 – емкость корректирующего рН реагента, 9, 10 – задвижка, 11 – насос, 12 – кран для регулирования расхода корректирующего рН реагента, 13 – смеситель, 14 – датчик электропроводности ($\chi_{К}^{25}$), 15 – калибруемый рН-метр, 16 – вычислительный блок, 17 – кран

С участием автора разработан новый способ косвенного определения показателя рН, концентрации аммиака, хлоридов, натрия (условного), основанный на измерениях удельной электропроводности охлажденных проб: прямой (χ) и Н-катионированной ($\chi_{Н}$) пробы питательной воды и пара. Способ реализован в анализаторе «Лидер-АПК» (рис. 11, 12).

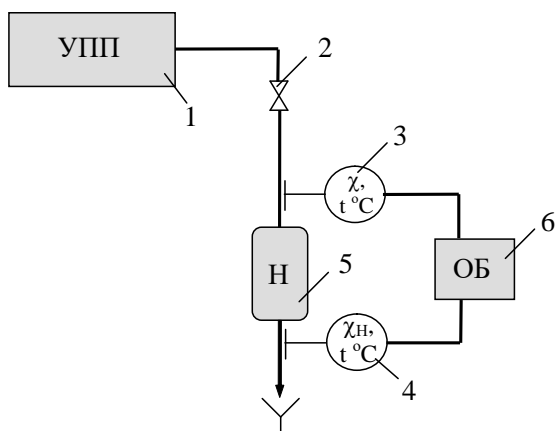


Рис. 11. Принципиальная схема приборного комплекса



Рис. 12. Анализатор примесей «Лидер-АПК»

«Лидер-АПК» является совместной разработкой кафедры ХХТЭ ИГЭУ и «НПП Техноприбор» (г. Москва), выполнившего промышленный образец, и

может применяться на ТЭС, включая энергоблоки ПГУ, для контроля качества добавочной глубокообессоленной воды, питательной воды и конденсата пара.

Промышленные испытания опытного образца автоматического анализатора «Лидер-АПК» на Петрозаводской ТЭЦ и Костромской ГРЭС показали высокую работоспособность прибора для косвенных измерений рН с ошибкой в пределах паспортной ошибки промышленного рН-метра ($\pm 0,05$ ед. рН), косвенных измерений концентрации аммиака в водах типа конденсата с ошибкой в пределах 5%, косвенных измерений концентрации хлорид-ионов и суммарной концентрации катионов жесткости и натрия в пересчете на натрий без оценки точности измерений. В 2017 году анализатор представлялся на Всемирном инновационном салоне в Женеве (Швейцария), где был отмечен золотой медалью.

Автором проведено расчетное исследование применения разработанной методики для ряда ТЭС.

Основные выводы и результаты

1. Проведен комплекс исследований водно-химических режимов и систем химико-технологического мониторинга энергоблоков ПГУ, обеспечивших приведение методов и средств автоматического химического контроля на основе измерений электропроводности и рН в соответствие современным требованиям к качеству водного теплоносителя энергообъектов рассматриваемого типа.

2. Составлены и решены основанные на теории растворов электролитов системы уравнений, описывающих ионные равновесия в питательной и котловой воде энергоблоков с ПГУ для двух видов ВХР: фосфатного и гидратного; разработаны методики, алгоритмы и аналитические зависимости для расчета ряда нормируемых показателей качества питательной и котловой воды на основе измерений электропроводности охлажденных прямой и Н-катионированной проб, в частности: показателя рН, концентрации аммиака, натрия (условного) и хлоридов – для питательной воды; фосфатов, гидратов, карбонатов и хлоридов – для котловой воды.

3. Разработаны методики косвенного определения рН для малобufferных предельно разбавленных водных растворов, что обеспечило возможность контроля рН только по измерениям удельной электропроводности охлажденных проб и возможность калибровки штатных рН-метров непосредственно в производственных условиях. Предложенные методики положены в основу алгоритма расчета для отечественного анализатора нового поколения «Лидер-АПК», применимого для автоматического химконтроля охлажденных проб воды и пара энергоблоков ПГУ.

4. Проведены исследования на лабораторном стенде с использованием модельных монорастворов и растворов смеси электролитов для проверки зависимостей, положенных в основу расчетных методик, в том числе анализатора «Лидер-АПК», для отработки методики калибровки рН-метров в услови-

ях сверхчистой воды типа конденсата паровых турбин, получены патенты на соответствующие способы и устройства, применимые в теплоэнергетике.

5. Проведена промышленная апробация разработанных методик, способов и устройств химического контроля ВХР блоков ПГУ на Ивановских ПГУ, Северо-Западной ТЭЦ г. С.-Петербурга, Минской ТЭЦ-5 и др. Показано, что косвенное (расчетное) определение таких показателей, как рН и концентрации аммиака, солесодержания и концентрации фосфатов по измерению удельной электропроводности охлажденных проб может выполняться в пределах 10%-ого отклонения от аналитически измеренных значений.

6. Разработанный способ измерения рН малобуферных вод типа конденсата и реализующее его устройство – анализатор «Лидер-АПК», – были оценены «Золотой медалью» на международном инновационном салоне в Женеве в 2017 году. Разработанные приборные системы, методики и устройства используются в учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» в ИГЭУ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России:

1. Ларин А.Б. Измерение рН в условиях сверхчистой среды конденсата и питательной воды энергоблоков / Ларин А.Б., Ларин Б.М., **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Киет С.В. // Теплоэнергетика, 2018. – №11. – С. 97-102.

2. Ларин Б.М. Нормы качества водного теплоносителя и отраслевой стандарт по водоподготовке и водному режиму на ТЭС / Ларин Б.М., Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.** // Энергосбережение и водоподготовка, 2015. – №4(96). – С. 56-60.

3. Ларин А.Б. Методика расчета рН и концентраций ионных примесей питательной воды на ТЭС по измерениям удельной электропроводности / Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.** // Вестник ИГЭУ, 2016. – Вып. 5. – С. 10–15.

4. Ларин А.Б. Расчет концентраций ионных примесей в предельно разбавленных водных растворах типа конденсата и питательной воды паровых котлов ($p_6 > 10$ МПа) / Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.** // Вестник ИГЭУ, 2017. – Вып. 2. – С. 13–17.

5. Ларин Б.М. Развитие автоматического химконтроля на ТЭС на основе измерений электропроводности и рН / Ларин Б.М., **Сорокина (Иванова) А.Я.** // Энергосбережение и водоподготовка, 2017. – №4(108). – С. 15–19.

Патенты на изобретения, патенты на полезные модели

6. Патент на изобретение РФ №2658020. МПК C02F1/44, C02F9/00, G01N1/10, G01N35/08, G01N33/18, G09B23/24. Лабораторная установка обратного осмоса и химического обессоливания / Ларин А.Б., Трухин Д.С., **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Власов Н.В.; заявл. №2016147131 от 24.03.2016; опубл. 19.06.2018. Бюл. №17.

7. Патент на изобретение РФ №2573453. МПК G0121/27, G01N33/18. Способ определения рН малобуферных предельно разбавленных растворов типа конденсата / Ларин Б.М., Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Киет С.В.; заявл. №2014133634 от 14.08.2014; опубл. 20.01.2016. Бюл. №2.

8. Патент на полезную модель РФ №153825. МПК H02K9/19. Контур водяного охлаждения обмотки статора электрогенератора паровой турбины / Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.**; заявл. №2014144781 от 05.11.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. №22.

Прочие публикации

9. Колегов А.В. Анализ состояния водно-химического режима энергоблока ПГУ-210 / Колегов А.В., **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Ларин А.Б. // Матер. докл. VIII Междунар. молодеж. науч. конф. «Тинчуринские чтения». Т. 2. – Казань: КГЭУ, 2013. – С. 98–99.
10. **Сорокина (Иванова) А.Я.** Разработка алгоритма расчета показателей качества теплоносителя на базе штатных приборов автоматического химконтроля / **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Ларин А.Б. // Матер. докл. IX Междунар. молодеж. науч. конф. «Тинчуринские чтения». Т. 2. – Казань: КГЭУ, 2014. – С. 129.
11. **Сорокина (Иванова) А.Я.** Расчет нормируемых показателей качества теплоносителя, основанных на измерении электропроводности и рН / **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Ларин А.Б. // IX Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Энергия–2014»: Матер. конф. Т. 1, Ч. 1. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – С. 192–196.
12. Ларин А.Б. Совершенствование химконтроля водного режима на ТЭС на основе измерений электропроводности и рН / Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.** // Сб. матер. докл. Национального конгресса по энергетике. – Казань: КГЭУ, 2014. – С. 260–265.
13. **Сорокина (Иванова) А.Я.** Разработка автоматического анализатора примесей водного теплоносителя / **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Ларин А.Б. // Тезисы докл. XXI Междунар. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т.4. – М.: МЭИ, 2015. – С. 43.
14. **Сорокина (Иванова) А.Я.** Промышленные испытания нового автоматического анализатора примесей водного теплоносителя / **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Ларин А.Б. // X Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Энергия–2015»: Матер. конф. Т. 1. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 107–108.
15. Ларин А.Б. Испытание импортзамещающих автоматических анализаторов качества водного теплоносителя для энергоблоков ТЭС и АЭС / Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.** // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения)». Т. 2. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 110–114.
16. **Сорокина (Иванова) А.Я.** Разработка технологического обеспечения систем химического контроля водного режима энергоблоков с ПГУ / **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Лапина А.А., Ларин А.Б. // XIII Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Энергия–2018»: Матер. конф. Т. 1. – Иваново: ИГЭУ, 2018. – С. 30.
17. Ларин А.Б. Измерение рН в условиях сверхчистой среды конденсата и питательной воды энергоблоков / Ларин А.Б., **Сорокина (Иванова) А.Я.**, Квет С.В. // Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. «Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи». – М.: ОАО "ВТИ", 2017. – С. 74–78.

ИВАНОВА Анастасия Ярославовна
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВОДНОГО
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЭНЕРГООБЛОКОВ ПГУ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И рН

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
Подписано в печать 29.03.2019г. Формат 60x84¹/₁₆ Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ № ____.

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.