

БЕЛОКОНОВА НАДЕЖДА АНАТОЛЬЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ КОНТРОЛЯ
И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
ПОДГОТОВКИ ВОДЫ НА ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" и в химической службе Свердловского филиала ОАО «ТГК-9»

Официальные оппоненты: Лауреат премии Правительства РФ,
Заслуженный работник ЕЭС России,
доктор технических наук, профессор
Петрова Тамара Ивановна

Засуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор
Баскаков Альберт Павлович

доктор технических наук, профессор
Ларин Борис Михайлович

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский теплотехнический
институт»

Защита состоится 26 июня 2009 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 при ГОУ ВПО "Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" по адресу: Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5, 8-й учебный корпус УГТУ-УПИ, ауд.Т-703

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО УГТУ-УПИ

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 19, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, ученому секретарю совета. Телефон: (343) 375-45-74, факс (343) 326-45-62, e-mail: lta_ugtu@mail.ru

Автореферат разослан « » _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.Э.Аронсон

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Надежность и экономичность работы оборудования тепловых электрических станций (ТЭС) в значительной степени зависит от надежности работы водоподготовки (ВПУ) и состава технологической воды, в том числе от содержания в ней органических примесей (ОПР).

Специалистами МЭИ, ВТИ, «Свердловэнерго» установлено, что ОПР:

- способствуют повреждаемости оборудования; известны случаи аварийных остановов ТЭС вследствие разрушения оборудования кислыми продуктами деструкции ОПР, содержащимися в обессоленной воде или недостаточно очищенном конденсате;

- участвуют в формировании в энергетических котлах отложений, которые при забросе в турбину (особенно в период пуска) приводят к ее загрязнению и абразивному износу, снижая эффективность работы основного оборудования.

Из работ ВТИ, ОРГРЭС (г. Москва) известно, что содержащиеся в исходной воде природные ОПР создают и ряд специфических проблем в процессах водоподготовки:

- ухудшают эффективность предварительной очистки воды и ионного обмена в связи со способностью к комплексообразованию с металлами и с адсорбцией на поверхности ионитов;

- способствуют разрушению ионитов и «вторичному загрязнению» очищенной воды продуктами их деструкции;

- влияют на органолептические показатели и эпидемиологическую безопасность сетевой воды в открытых схемах теплофикационного контура (ТФК).

Оптимальный вариант решения указанных проблем – это эффективное удаление ОПР в процессе водоподготовки. Для этого необходим оперативный, надежный и непрерывный аналитический контроль воды, позволяющий своевременно корректировать процесс ее очистки. Такой контроль может обеспечить автоматизированная система контроля и управления технологическим процессом водоподготовки (АСУ ТП ВПУ), реализация которой в настоящее время является актуальной задачей ТЭС.

В связи с этим возникла проблема подбора методик аналитического контроля, пригодных для автоматизации процессов очистки воды. К числу основных требований, которым должны удовлетворять эти методики, относятся: простота, достоверность, надежность и оперативность определения не только состава, но и свойств ОПР, которые проявляются в различных технологических процессах. Однако этим условиям не соответствуют не только методики определения ОПР (цветность, перманганатная и бихроматная окисляемость), которые используются в отечественной практике, но и методика определения общего органического углерода (ООУ), рекомендованная международным стандартом ИСО 8245.

Таким образом, для решения актуальной задачи на ТЭС – автоматизации контроля водоподготовки и водно-химического режима (ВХР) – необходима

разработка новых способов количественного определения ОПР, а также методов оценки их свойств.

Цель работы: Совершенствование методологии аналитического и технологического контроля вод ТЭС путем поиска, исследований, разработки, обоснования и реализации новых методик определения количественного содержания ОПР и критериев оценки их физико-химических свойств для снижения накипеобразования и коррозии поверхностей нагрева теплоэнергетического оборудования.

Научная новизна

1. Доказано, что установленная количественная зависимость интенсивности полос поглощения (ПП) $n-\pi^*$ и $\pi-\pi^*$ электронных переходов в УФ-области спектра от содержания природных ОПР в воде, отражающая их состав и структуру, наиболее пригодна для контроля состава воды, по сравнению с показателем «окисляемость». Установлено, что спектрофотометрическое определение содержания ООУ в производственных водах ТЭС возможно при использовании коэффициентов пересчета на содержание ООУ в стандартном растворе. Впервые разработан и обоснован критерий минимального содержания ОПР в обессоленной воде и конденсате в технологической схеме водоподготовки ТЭС: если величина светопропускания более 97 % (условия измерения: кювета с длиной оптического пути 50 мм, длина волны – 254 нм).
2. Установлено, что мерой оценки чистоты и диагностики ионитов в технологической схеме водоподготовки ТЭС могут служить как величина светопропускания очищаемой воды, находящаяся в пропорциональной зависимости от сорбционной емкости ионита по ОПР, так и величина их диэлектрической проницаемости. Доказано, что природные ОПР, способствуя разрушению анионитов в фильтрах I ступени (ОН-I ступени), обуславливают «вторичное загрязнение» обессоленной воды продуктами их деструкции: в летний период времени, с увеличением содержания природных ОПР, содержание продуктов деструкции в обессоленной воде может увеличиваться в 2-10 раз.
3. Обоснована целесообразность использования для оценки свойств ОПР по отношению к гидроксиду железа (Ш) и к продуктам его коррозии величины коэффициента комплексообразования $K_{\text{коп}}$. Доказана взаимосвязь коэффициента $K_{\text{коп}}$ с константой устойчивости – традиционным критерием оценки свойств комплексных соединений определенного состава. Установлено, что устойчивость комплексов Fe (III) с природными ОПР сопоставима с устойчивостью комплексов с салициловой кислотой или трилоном Б; показано, что снижение устойчивости происходит в следующем порядке: трилон Б, фталевая кислота, природные ОПР, салициловая кислота, продукты деструкции ионообменных смол (АВ-17, КУ-2-8). Впервые доказано влияние природных ОПР на коррозионную активность ингибитора ИОМС-1 по отношению к железу как конструкционному материалу: коррозионную активность ОПР можно снизить в 6-7 раз, что способствует снижению скорости коррозии обо-

рудования, процессов накипеобразования и улучшает органолептические свойства горячей воды.

4. Установлено, что загрязнению оборудования ТФК ТЭС отложениями способствует неполное осаждение алюминия в процессе реагентной обработки воды сульфатом алюминия. Катионы алюминия взаимодействуют с ОПР, присутствующими в воде, и образуют устойчивые комплексные соединения. В результате этого процесса содержание алюминия определяется с большой погрешностью, отсутствует возможность своевременной корректировки реагентных режимов, увеличивается скорость накипеобразования и загрязнения оборудования. Показано, что скорость формирования отложений зависит от дозы ингибитора ИОМС-1, применяющегося в технологии водоподготовки ТЭС, и особенностей схемы подготовки горячей воды.
5. Установлено, что состояние внутренней поверхности прямоточного котла на участке «питательная вода – встроенная задвижка» может оцениваться, исходя из результатов непрерывного измерения величины светопропускания воды в УФ-области спектра, поскольку установлена зависимость между относительным изменением величины светопропускания и изменением содержания железа в питательной и промывочной воде в диапазоне концентраций 20-500 мкг/дм³. Доказано, что для контроля процесса отмывки энергетических котлов от продуктов коррозии железа может быть использован спектрофотометрический метод, который позволит сократить процесс растопки на 2 часа и снизить расход обессоленной воды на 300-400 тонн.
6. Установлена возможность оценки свойств неорганических и органических примесей в водных растворах с помощью ИК- и УФ-спектрофотометрии. Исследовано влияние лазерного излучения на сольватирующие свойства воды по отношению к комплексу Fe (III) – ООУ. Доказано, что совместное воздействие ультрафиолетового и лазерного излучения повышает структурную упорядоченность воды, способствуя увеличению растворимости солей кальция и замедлению их осаждения.
7. Доказана необходимость использования таких показателей, как ООУ и $K_{\text{коп}}$ при мониторинге водисточника ТЭС и при разработке профилактических мер по защите ионитов от негативного воздействия ОПР.

Практическая значимость работы

- Результаты исследований и разработанный критерий оценки минимального содержания ОПР использованы при разработке Национального стандарта для определения содержания общего и растворенного органического углерода во всех типах вод.
- На основе измерения величин светопропускания в УФ-области спектра разработана и аттестована УНИИМ методика количественного экспресс-контроля содержания природных ОПР на разных стадиях подготовки производственных вод, пригодная для использования в составе АСУ ТП ВПУ.
- Разработан принципиально новый метод диагностики состояния ионитов по величине диэлектрической проницаемости, позволяющий оперативно

осуществлять контроль чистоты ионита как товарного продукта, так и ионита после различных условий эксплуатации.

- Разработана и аттестована УНИИМ методика оценки комплексообразующих свойств ОНР по отношению к продуктам коррозии железа, которая необходима для оптимизации реагентного режима в процессах подготовки добавочной и подпиточной воды и для оценки свойств органических реагентов по отношению к соединениям железа (III).
- Разработана методика экспресс-контроля содержания железа в промывочных водах, использование которой позволяет сократить время пуска, снизить загрязненность оборудования и увеличить эффективность его работы.
- Разработана методология контроля, основанная на оценке изменений физико-химических свойств водных растворов по отношению к соединениям кальция и железа, предназначенная для организации систем технологического контроля на ТЭС и выбора оборудования для безреагентного воздействия на накипеобразующие и коррозионные свойства производственных вод (аппараты УЗ- и магнитной обработки и другие устройства).

Реализация работы

- С 2008 года введен в действие Национальный стандарт «Вода. Методы определения массовой концентрации общего (ООУ) и растворенного (РОУ) органического углерода», разработанный рабочей группой специалистов инженерно-технического центра – Свердловский филиал ОАО «ТГК-9» и аналитического центра контроля качества воды ЗАО «РОСА» (г. Москва) по инициативе и при непосредственном участии автора.
- Методика определения содержания ингибитора ИОМС-1 используется для контроля и корректировки процессов водоподготовки и ведения водно-химического режима на предприятиях территориальной генерирующей компании №9 (ТГК-9) Ново-Свердловской, Свердловской, Богословской, Красногорской, Артемовской, Чайковской ТЭЦ, Нижнетуринской ГРЭС, а также на предприятиях ОГК-5 (Среднеуральской ГРЭС), ОГК-1 (Серовской и Пермской ГРЭС), ТГК-13 (предприятия Красноярскэнерго).
- Прибор автоматического контроля АЖТ-94/4С, изготовленный в соответствии с техническим заданием автора по результатам проведенных исследований, используется в системе технологического контроля производственных вод на Первоуральской и Чайковской ТЭЦ.
- Принят к реализации на 10 блоках Рефтинской ГРЭС проект системы химико-технологического мониторинга, разработанный на основе проведенных исследований, который позволяет обеспечивать эффективную работу основного оборудования ТЭС за счет надежного контроля состава технологических вод и своевременной корректировки ВХР при различных эксплуатационных режимах.
- Разработанные методы контроля содержания и свойств ОНР внедрены для оценки работы биомодуля, установленного на канале, отводящем воду из конденсаторов турбин Среднеуральской ГРЭС, и предназначенного для очистки воды от фитопланктона.

- Технологический контроль воды питьевого качества, разработанный на основе методики оценки свойств водных растворов по отношению к соединениям кальция и железа, реализован на предприятии ТОО «Кокшетау-минводы» (Казахстан).

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, планировании и проведении экспериментов, разработке экспериментальных установок, анализе и обобщении экспериментальных данных и эксплуатационных результатов. Автором выдвинуты положения, составляющие основу методологии, методов и приборов технологического контроля.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на симпозиуме «Чистая вода России-97» (Екатеринбург, 1997); III Международном конгрессе «Вода: экология и технология» (Москва, 2000); III Конференции «Чистая вода России-2001» (Екатеринбург, 2001); V Международном конгрессе «Вода: экология и технология». Экватэк-2002 (Москва, 2002); Российском энергетическом форуме (Уфа, 2003); VI Международном конгрессе «Вода: экология и технология». Экватэк-2004 (Москва, 2004); конференции «Аналитический контроль качества воды в теплоэнергетике» (Москва, 2004); Первой специализированной выставке «Экология в энергетике» (Москва, 2004); научно-техническом семинаре «Водно-химические режимы и водоподготовка на ТЭС» (Москва, 2004); VIII Международном симпозиуме «Чистая вода России-2005» (Екатеринбург, 2005); VII Международном конгрессе «Вода: экология и технология». Экватэк-2006 (Москва, 2006); Водно-химическом форуме (Москва, 2008); научно-техническом семинаре «Водно-химические режимы и водоподготовка на ТЭС» (Москва, ВТИ, 2008); VIII Международном конгрессе «Вода: экология и технология». Экватэк-2008 (Москва, 2008).

Публикации. Основные результаты опубликованы в 33 печатных работах (в том числе: 1 монография, 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК), 6 патентах и 1 свидетельстве на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 7 глав, введения, заключения, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 250 страницах, включает 37 таблиц, 52 рисунка и 190 ссылок на литературу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** рассмотрены особенности и проблемы существующего аналитического контроля водоподготовки на тепловых электростанциях (ТЭС) и сформулированы задачи исследования.

Вода на ТЭС используется в качестве рабочей среды в основном контуре (ОК), в качестве теплоносителя – в теплофикационном контуре (ТФК), в качестве охладителя – в охлаждающем контуре (ОХК). Пароводяные потери в ОК и ТФК компенсируются очищенной водой, поступающей с водоподготовительных установок (ВПУ).

Традиционные схемы подготовки воды для подпитки ОК и ТФК включают предочистку и ионный обмен. Широко распространены схемы подготовки подпиточной воды для ТФК с добавлением реагентов-комплексон

(технология ингибирования). Перечень реагентов, которые могут быть использованы в ТФК, расширяется ежегодно, но нет однозначных критериев выбора реагентов с учетом особенностей свойств ОПР, присутствующих в производственных водах, технологических схем подготовки подпиточной и сетевой воды, отсутствуют методы производственного контроля для своевременной корректировки процессов водоподготовки. В ОХК проблемы, связанные с осаждением неорганических и органических примесей, решают различными способами: механическими, химическими, биологическими, в зависимости от результатов контроля состава воды и состояния оборудования.

В настоящее время для своевременной оценки и корректировки процессов водоподготовки на ТЭС активно внедряются автоматические системы сбора и анализа информации – системы химико-технологического мониторинга (СХТМ). Эффективность работы СХТМ зависит от надежности методов и приборов для контроля состава и свойств производственных вод.

Контроль состава воды на разных стадиях ее подготовки подразделяется на эксплуатационный (постоянный) и лабораторный (периодический). Качество исходной и очищенной воды оценивается по перечню следующих показателей, характеризующих ее состав и свойства: взвешенные вещества, сухой остаток, солесодержание, рН, железо, жесткость, щелочность, натрий, хлориды, сульфаты, окисляемость, карбонатный индекс и другие.

Внедрение в технологию водоподготовки автоматических приборов: рН-метров, кондуктометров и мутномеров – позволило обеспечить надежный автоматический контроль содержания грубодисперсных и растворенных неорганических примесей в очищенной воде. Однако существующее состояние методического обеспечения аналитического контроля ОПР в воде неудовлетворительное. Так, определяемый на ТЭС России показатель «окисляемость» не дает полного представления о свойствах и составе ОПР и не позволяет определять отдельные органические вещества, которые не окисляются в условиях этого метода контроля.

Международный стандарт определения содержания ОПР в соответствии с ИСО 8245, заключающийся в определении содержания ООУ, пригоден для определения всех органических веществ, однако, как и другие известные методы, этот метод не позволяет оценивать особенности свойств ОПР, их способность к взаимодействию с другими веществами или с защитными оксидными пленками на поверхности металла оборудования. В связи с этим использование и нормирование показателя ООУ не решает кардинально проблемы контроля процессов водоподготовки и корректировки ВХР, в то время как актуальность этих проблем повышается в связи с использованием в производственном процессе органических реагентов для консервации оборудования или ведения ВХР.

Таким образом, для совершенствования системы контроля и управления технологическими процессами подготовки воды на ТЭС необходимо решить следующие задачи:

1) разработать оперативные методы количественного определения содержания ОПР в различных водных растворах;

2) разработать и обосновать методологический подход к организации технологического контроля водоподготовки ТЭС, который позволит гарантировать стабильность содержания ОПР в очищенной воде.

Во второй главе приведены характеристики объектов исследования, методическое и приборное обеспечение экспериментов. Характеристика вод – основных объектов исследования – приведена в табл. 1.

Выбор данных объектов обусловлен их широким использованием для водоснабжения промышленных предприятий и населения, а также недостаточной информацией о характере их загрязнения углеродсодержащими соединениями и влиянием последних на качество производственной воды.

Кроме вод, объектами исследований также являлись: ингибитор накипеобразования ИОМС-1, ионообменные материалы МР-64, АН-31 и АВ-17.

Для получения экспериментальных данных использованы следующие приборы и методы анализа:

1) приборы-анализаторы определения общего органического углерода: С-mat 5500 («Штроляйн», Германия) и ТСМ 480 (фирма Carlo Erba, Италия);

2) ионный хроматограф «Стайер» («Аквилон», Россия). Методика определения – ГОСТ Р 52181-2003;

3) спектрофотометр СФ-2000. Погрешность при измерении спектральных коэффициентов – 1%, пределы допускаемого значения абсолютной погрешности в установке длины волны $\pm 0,4$ нм;

Таблица 1

Состав исходных вод – основных объектов исследования

Показатели	Единицы измерения	Поверхностные воды			Горводопровод г. Екатеринбург	Артезианские воды	
		оз. Исеть (СУГРЭС)	Водохран. РефтГРЭС	р. Чусовая (ПТЭЦ)		№1	№2
Солесодержание	мг/дм ³	130-160	160-260	115-201	228	240,3	241
рН		6,8-7,5	7,5-7,9	6,88-7,37	7,18	7,3	8
Жесткость общая	Ж°	2,1-2,4	2,5-2,9	1,2-2,7	2,5	2,14	3,2
Кальций	мг/дм ³	не опр.	не опр.	18-40	34	36,1	30
Магний	мг/дм ³	не опр.	не опр.	6-13	9,6	6,7	20,4
Гидрокарбонаты	мг/дм ³	24-48	61-104	49-75	91,5	109,8	167,8
Сульфаты	мг/дм ³	15-38	31-51	39-83	58,2	46,8	11,5
Хлориды	мг/дм ³	5-15	19-29	5-8	16,2	18,7	3,16
Фториды	мг/дм ³	0,15-0,3	0,3-0,7	0,1	0,28	0,68	0,17
Кремний	мг/дм ³	0,5-5,0	0,5-8,0	11-26	5,85	10,0	6,53
Железо	мг/дм ³	0,6-1,3	0,15-0,6	0,4-1,0	0,29	0,01	0,02
Окисляемость	мгО/дм ³	15-20	9-16	5-9	5,4		

4) мост переменного тока Р 5083;

5) ИК-спектры проб сняты на спектрофотометре Spekord IR-75 на пластинках KRS в области 400-4000см⁻¹;

б) химический анализ выполнен по следующим нормативным документам:

- жесткость (общая, кальциевая, магниевая) по ГОСТ 52407-2005, СО153-34.37.523.8-8;
- щелочность по СО 153-34.37.523.24.7-88;
- цветность, мутность, взвешенные вещества по ГОСТ 3351-74, РД 52.24.497-2005, РД 52.24.496-2005, СО 153-34.70.953.13-90;
- окисляемость по ПНД Ф 14.1.2:4.154-99, СО 153- 34.37.523.10-88;
- алюминий по ГОСТ Р 51309-99, СО 153-34.37.523.11-90;
- железо по СО153-34-70-953.4-88, ГОСТ 51309-99, ПНД Ф14.1.2:4.139-88;
- нефтепродукты по РД 52.24.476-95, СО 153- 34-70-953.18-90;
- удельная электрическая проводимость по СО 153-34.37.302-2002, РД 52.24.495-2005;
- массовая концентрации ингибитора ИОМС-1 – по методике, разработанной в инженерно-техническом центре – Свердловский филиал ОАО «ТГК-9» и аттестованной в УНИИМ (свидетельство № 253.13.17.307/2006);
- летучие галогенорганические соединения по ГОСТ Р 51392-99.

Третья глава посвящена исследованиям и разработке методологии контроля содержания ОПР в конденсате и в обессоленной воде ТЭС, а также оценке их свойств по отношению к другим примесям, содержащимся в воде. Работа проводилась в несколько этапов.

В тракте блоков СКД осуществляется очистка всего конденсата на блочной обессоливающей установке (БОУ). Эффективность работы БОУ по удалению неорганических примесей оценивается по электропроводимости, которая контролируется после всех фильтров ФСД, установленных на БОУ. Содержание ОПР в очищенном конденсате не определяется, так как не установлены нормативные значения и критерии контроля.

По полученным экспериментальным данным, электропроводимость очищенного конденсата на БОУ составляла 0,05 мкСм/см («теоретически чистой» от ионных примесей воды – 0,035 мкСм/см), а содержание ОПР (по ООУ) 0,2-0,6 мг/дм³, тогда как нормируемое значение ОПР за рубежом – 0,2 мг/дм³.

Таким образом, учитывая высокую эффективность очистки от ионных примесей и отсутствие метода контроля ОПР, первый этап экспериментальных исследований был посвящен разработке оперативного метода определения содержания ОПР в обессоленной воде и конденсате ТЭС менее 0,2 мг/дм³. Отсутствие такого критерия исключало возможность решения вопросов совершенствования аналитического контроля и нормирования концентрации ОПР в обессоленной воде и конденсате ТЭС.

Исходя из анализа известных способов контроля, а также учитывая, что «чистая вода» не поглощает УФ-излучение и минимальная концентрация неорганических ионных примесей в конденсате определена, для разработки критерия минимального содержания ОПР была исследована величина светопропускания в УФ-области спектра.

В результате проведенных исследований, анализа и статистической обработки величин светопропускания в УФ-области спектра и содержаний ООУ в производственных водах ТЭС установлено, что при содержании РОУ природного происхождения менее $0,2 \text{ мг/дм}^3$ величина светопропускания (Т) в УФ-области спектра составляет более 97 % (условия измерений: длина волны (λ) – 254 нм, кювета с длиной оптического пути 50 мм). Этот критерий качества воды был заложен в Национальный стандарт для обеспечения стабильности градуировочных характеристик анализатора ООУ, контроля чистоты мембранных фильтров (при определении РОУ) и использовался для исследования качественного состава воды в тракте блоков сверхкритического давления (СКД).

Следующий этап экспериментальных работ был посвящен исследованию возможности качественной оценки вод блоков СКД 300 МВт Рефтинской ГРЭС по величине светопропускания и содержанию ООУ. Из результатов исследований, представленных на рис.1, видно, что вода блока №3 Рефтинской ГРЭС, отличающаяся от воды других блоков высоким содержанием ООУ, находящимся в пределах от $0,65$ до 1 мг/дм^3 , имеет самые низкие значения Т.

В свою очередь вода остальных блоков СКД, содержащая ООУ в пределах от $0,2$ до $0,6 \text{ мг/дм}^3$, характеризуется более высоким уровнем Т.

Однако, как следует из рис. 2, отражающего результаты дискретного контроля величины светопропускания в тракте блока СКД №1 в течение двух суток, состав вод характеризовался значительным колебанием показателя Т, а значит, и различным содержанием ООУ.

Как было установлено позднее, причиной наблюдаемого изменения качественного состава вод в этот период могло быть изменение концентрации в производственных водах таких примесей, как нефтепродукты, продукты деструкции ионитов на БОУ, природные ОПР или поступление в конденсат продуктов коррозии оборудования.

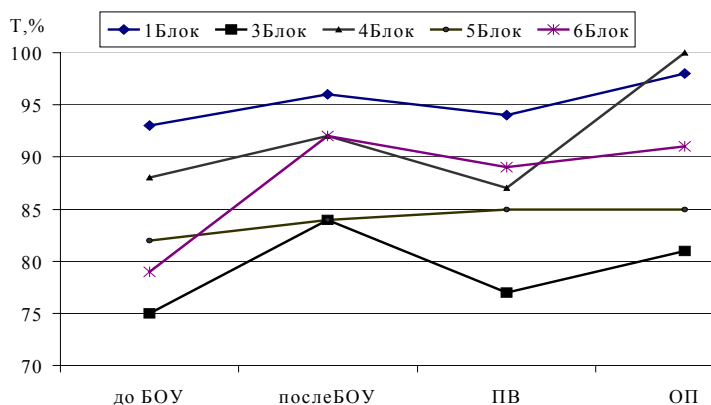


Рис. 1. Результаты контроля величины светопропускания вод тракта блоков 300 МВт РефТГРЭС

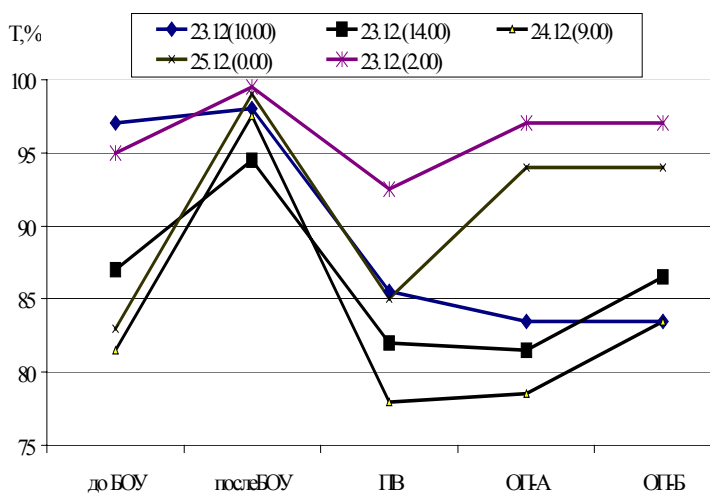


Рис. 2. Результаты контроля величины светопропускания (Т) в водах блока №1 РефТГРЭС в течение двух суток

Таким образом, экспериментально доказано, что величина T (СФ-26,254 нм) может служить суммарным критерием чистоты воды в тракте блоков СКД.

При работе блоков в стационарном режиме содержание ОНР в тракте обычно оценивается качественно, по величине $\Delta pH_{(ПВ-ОН)}$, означающей разницу между значениями pH питательной воды (ПВ) и острого пара (ОН): $\Delta pH_{(ПВ-ОН)} = (pH)_{ПВ} - (pH)_{ОН}$. Величина $\Delta pH_{(ПВ-ОН)}$ зависит от специфики свойств ОНР, эффективности работы деаэраторов, схемы удаления коррозионно-активных газов, то есть это относительный качественный критерий наличия ОНР в тракте блока. Если $\Delta pH_{(ПВ-ОН)}$ менее 0,2, то pH ПВ увеличивают подачей в нее аммиачной воды.

В результате статистической обработки результатов анализа $\Delta pH_{(ПВ-ОН)}$ установлено, что вследствие поступления продуктов деструкции анионита АВ-17 в тракт блока контроль содержания ОНР по значению $\Delta pH_{(ПВ-ОН)}$ неприемлем. Это обусловлено тем, что в структуре АВ-17 имеются активные аминные центры, которые при разрушении ионита и термоллизе образуют соединения основного характера, снижающие величину $\Delta pH_{(ПВ-ОН)}$. В связи с этим была исследована возможность использования для экспресс-контроля поступления продуктов деструкции ионитов в конденсат величины относительного изменения электропроводимости конденсата. Подтверждено экспериментально, что при разрушении анионита увеличивается концентрация электролитов в конденсате за счет ранее адсорбированных на активных центрах анионов, поэтому после всех фильтров смешанного действия (ФСД) на БОУ увеличивается электропроводимость.

Для контроля нефтепродуктов и своевременной корректировки режима работы БОУ в отраслевых документах приведены их предельно допустимые концентрации и рекомендовано использование анализаторов нефтепродуктов, в то время как контроль других ОНР не предусмотрен. Учитывая различную природу и воздействие этих ОНР на состояние оборудования ТЭС, было необходимо оценить их влияние на металл оборудования – железо. Известно, что ОНР, содержащиеся в конденсате после БОУ, при увеличении температуры и давления в тракте блока могут разлагаться с образованием низкомолекулярных неорганических и органических кислот, которые повреждают защитную пленку на внутренней поверхности теплонапряженной зоны НРЧ-II, образуя рыхлые отложения. В то же время доказано, что органические реагенты на основе аминов при высоких температурах образуют прочные защитные пленки.

В связи с этим для разработки метода оценки способности ОНР к растворению оксидных соединений железа представлялось целесообразным провести эксперименты по моделированию свойств ОНР, на основании результатов которых будет возможна оптимизация условий контроля и корректировки водно-химического режима. Для этого требовалось разработать приемлемую методику оценки химической активности ОНР по отношению к продуктам коррозии железа. В результате проработки научно-технической литературы и известных способов определения содержания соединений же-

железа в воде в основу методики был взят метод определения растворимости труднорастворимых веществ в водных растворах комплексообразующего агента (например, лиганда - nL^-).

Известно, что в присутствии лигандов (ОПР), склонных к комплексообразованию, содержание растворимых соединений железа в воде увеличивается с повышением прочности связи «железо – лиганд», то есть представляется возможным по изменению концентрации растворенных соединений железа в водном растворе (в виде железоорганического комплекса) оценивать устойчивость комплексов с железом (III). Условно процесс может быть выражен следующей реакцией:



Эксперименты по наработке данных и подтверждению пригодности этого способа для оценки устойчивости комплексов ОПР проводили в соответствии с ГОСТ 9.905-82. В водный раствор, содержащий ОПР, помещали индикаторную пластину из Ст-3 (индикатор), раствор с пластиной нагревали, выдерживали при температуре 70 °С в течение 1 часа, фильтровали и определяли содержание растворенных соединений железа. Продуктом коррозии индикатора в водном растворе, содержащем кислород, является малорастворимый гидроксид железа (III) $PP=3,8 \cdot 10^{-38}$. В соответствии со значением ПР (произведение растворимости) содержание растворимого железа в воде должно быть не более 20 мкг/дм³.

Количественно оценить устойчивость железо-органических комплексов можно по значению коэффициента комплексообразования ОПР ($K_{коп}$), который рассчитывается по формуле

$$K_{коп} = \Delta Fe / Fe_1, \quad (2)$$

где $\Delta Fe = Fe_2 - Fe_1 - Fe_3$;

$K_{коп}$ – коэффициент, оценивающий устойчивость комплексов ОПР;

Fe_1 и Fe_2 – содержание растворенного железа в анализируемом растворе до эксперимента и после взаимодействия с индикаторной пластиной соответственно;

Fe_3 – содержание железа в контрольном растворе, не содержащем примесей, после взаимодействия с индикаторной пластиной (контрольный опыт).

Значение $K_{коп}$ изменяется в широком диапазоне от -n до +n, причем чем больше значение n, тем в большей степени ОПР способны к образованию растворимых комплексных соединений железа (III) в водном растворе и тем выше устойчивость их комплексов. В то же время чем меньше значение n (в диапазоне $K_{коп}$ от -n до 0), тем в меньшей степени ОПР способны к образованию растворимых комплексов с железом (III) в водном растворе за счет взаимодействия с поверхностью индикаторной пластины или образования дисперсных систем.

Разработанный способ оценки комплексообразующих свойств водных растворов запатентован (Пат. 2267783 от 10.01.06). Методика определения значения $K_{коп}$ аттестована в УНИИМ и внесена в Федеральный реестр (ФР 1.31.2005.01705).

В табл. 2 представлены результаты эксперимента по определению содержания растворенных соединений железа в воде, содержащей органические добавки конкретного состава (салициловая, фталевая кислоты, трилон Б) или неопределенного состава (например, продукты деструкции ионитов, природные органические примеси, «Аминат ДС» – технический реагент на основе фосфоновых кислот), а также расчетные значения коэффициентов $K_{\text{коп}}$ для их комплексов с железом (III).

Таблица 2

Результаты исследования устойчивости комплексов различных органических лигандов с Fe (III) в водных растворах

№ п/п	Состав водного раствора	ООУ, мг/дм ³	Содержание железа, мг/дм ³			$K_{\text{коп}}$
			Fe ₁	Fe ₂	Fe ₃	
1	Салициловая кислота	5	0,05	0,31	0,09	3,4
2	Салициловая кислота	15	0,05	0,87	0,09	14,6
3	Фталевая кислота	5	0,05	0,72	0,09	11,6
4	Фталевая кислота	15	0,05	1,12	0,09	19,6
5	Трилон Б	5	0,05	2,62	0,09	49,6
6	Трилон Б	15	0,13	22,9	0,09	174,5
7	АМИНАТ ДС	12,7	0,24	4,78	0,04	19,0
8	Продукты деструкции АВ-17	3,7	0,02	0,12	0,07	1,5
9	Продукты деструкции КУ-2-8	4,16	0,02	0,10	0,07	0,5
10	10 % (об) исх. воды РефтГРЭС	1,66	0,04	0,41	0,07	7,5
11	7 % (об) исх. воды СУГРЭС	1,32	0,04	0,37	0,07	6,5
12	Нефтепродукты	0,79	0,04	0,25	0,07	3,5

В ходе экспериментальных исследований доказано, что содержание железа необходимо определять атомно-абсорбционным методом, так как при использовании для этой цели известного фотоколориметрического метода, основанного на образовании окрашенного сульфосалицилатного комплекса, полученные результаты неадекватны. Причиной этого является образование полилигандного комплекса (лиганды: сульфосалициловая кислота, ОПР).

Из представленных в табл. 2 данных виден рост величины $K_{\text{коп}}$ при увеличении концентрации трилона Б, фталевой и салициловой кислот. При одинаковом содержании органических веществ в воде (по ООУ) $K_{\text{коп}}$ снижается в следующей последовательности: трилон Б, фталевая кислота, аминат ДС, салициловая кислота. Эти данные согласуются с теоретическими представлениями о прочности химической связи рассмотренных соединений с металлами: салициловая кислота с металлом образует одну ионную связь, а фталевая кислота – две. Значение констант нестойкости комплексных соединений железа с салициловой кислотой и трилоном Б соответственно равны $3,5 \cdot 10^{-12}$ и $8 \cdot 10^{-26}$, то есть трилон Б образует с катионами железа (III) более прочное комплексное соединение, чем салициловая кислота.

Таким образом, разработана и экспериментально подтверждена возможность оценки комплексообразующих свойств ОПР в водных растворах по отношению к железу (III) по значению коэффициента $K_{\text{коп}}$.

Анализ свойств примесей в водах, поступающих в тракт блока, позволяет сделать вывод, что природные ОПР и нефтепродукты обладают более

высокими комплексообразующими свойствами, чем продукты деструкции ионитов.

Результаты исследований были внедрены на Рефтинской ГРЭС: потоки, содержащие нефтепродукты, были выведены из тракта блоков, для контроля и корректировки процесса удаления природных ОПР на ВПУ использовали дополнительный критерий – величину $T(254)$. Благодаря этим мероприятиям, значение $T(254)$ в тракте блоков стало выше 97 % (условия измерения: длина волны 254 нм, длина оптического пути 50 мм), а изменение величины T в тракте блоков составило 1-2 %, наряду с этим снизился рост загрязненности НРЧ-II и увеличился межпромывочный период в 2 раза.

Однако, в связи с изменением условий работы блоков после 1999 года, повысилось число пусков и остановов, и вновь начался рост рыхлых отложений. Причем наибольший процент заноса проточной части турбин имели блоки с большим количеством пусков, хотя условия пуска не отклонялись от режимной карты. Углубленный анализ процессов растопки позволил выявить, что причиной этого является отсутствие оперативного метода контроля содержания соединений железа в производственных водах в период растопки, поэтому последующий этап был связан с разработкой методики оперативного контроля содержания соединений железа.

Учитывая, что образование отложений происходит в атмосфере кислорода при температуре более 500 °С и $pH > 7$, было логично ожидать, что продукты коррозии, накопленные в процессе эксплуатации, в пусковом режиме будут удаляться с поверхности НРЧ в виде ультрамикродисперсных частиц. Классический метод контроля ультрамикродисперсных частиц (турбидиметрический) основан на измерении величины светопропускания. Известно: если растворитель (в данном случае – вода) и рассеивающие частицы бесцветны, то максимальная чувствительность достигается в УФ-области. Таким образом, представлялось возможным использовать измерения величины светопропускания в качестве косвенного метода оценки содержания нерастворимых соединений железа в воде.

В результате исследования величин светопропускания производственных вод (питательная вода, поток до ВЗ) была установлена линейная зависимость между взвешенными частицами, являющимися, как установлено, в основном продуктами коррозии железа, и оптической плотностью (рис. 3).

Полученная зависимость положена в основу методики контроля содержания взвешенных

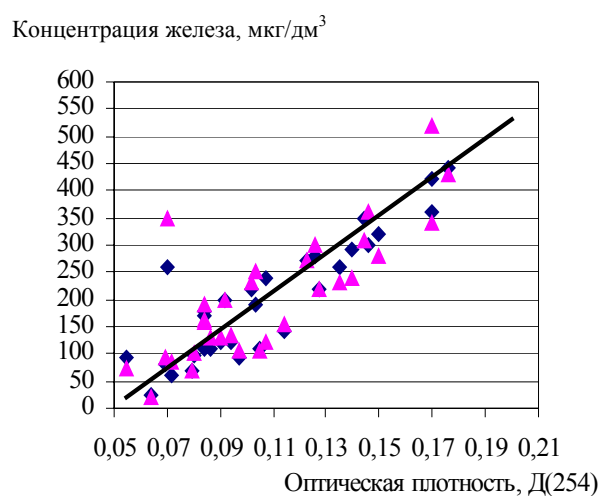


Рис. 3. Зависимость оптической плотности (прибор СФ-46, длина волны 254 нм, кювета 50 мм) от концентрации железа в производственных водах

соединений железа в производственных водах, в диапазоне концентраций 20-500 мкг/дм³.

В ходе промышленных испытаний было доказано, что использование предложенного экспресс-метода контроля содержания взвешенных соединений железа позволяет сократить потери обессоленной воды на собственные нужды на 300-400 т за одну растопку и сократить время растопки, как минимум, на 2 часа за счет сокращения времени на анализ содержания соединений железа традиционным методом. Кроме этого, было установлено, что по величине светопропускания, измеряемой в УФ-области спектра, можно оценивать и состояние внутренней поверхности котла на участке от входа питательной воды до встроенной задвижки.

Таким образом, в результате полученных в экспериментальных исследованиях новых знаний установлена возможность совершенствования системы технологического контроля в тракте блоков СКД ТЭС путем выполнения следующих мероприятий:

1) обеспечение непрерывного контроля величины светопропускания (при $\lambda = 254$ нм) в производственных водах с использованием относительно недорогих и простых в использовании отечественных или импортных автоматических приборов на основе спектрофотометрии в УФ-области. Для дискретного контроля ОПР можно использовать типовые спектрофотометры. Это позволит обеспечить надежный контроль за результатом взаимодействия ОПР с поверхностью оборудования;

2) включение в схему контроля качества конденсата оценку изменения его электропроводимости после всех фильтров ФСД на БОУ. Это позволит оперативно оценивать поступление продуктов деструкции анионита в конденсат и принимать своевременно соответствующие меры. Причем данный критерий не требует дополнительных приборов и может быть органично вписан в алгоритм контроля даже при развитой системе химико-технологического мониторинга;

3) использование разработанной методики для оценки комплексообразующих свойств ОПР или продуктов их термоллиза, поступающих в тракт блока или образующихся в технологическом процессе при различных эксплуатационных режимах;

4) внедрение метода экспресс-контроля промывочной воды на содержание нерастворимых соединений железа, присутствующих в промывочной воде, взвешенных веществ, обусловленных соединениями железа. Метод позволяет оценивать состояние внутренней поверхности на участке котла «питательная вода – встроенная задвижка» (теплонапряженная зона) и способствует снижению выноса продуктов коррозии оборудования в турбину.

Естественно предположить, что для снижения негативного воздействия ОПР на котельное оборудование необходимо обеспечивать стабильное содержание ОПР в добавочной и промывочной воде, а это возможно лишь при организации контроля за процессом их удаления на ВПУ.

В природных водах основным источником ОПР являются гуминовые и фульвовые кислоты, в состав которых входят эфирные, фенольные, карбокс-

сильные и хиноидные группы, связанные с бензольным кольцом (рис. 4). Также известно, что соединения, включающие бензольное кольцо, группы CCH_2 , C=O , OH , COOH и другие, характеризуются в УФ-спектрах в среде различных растворителей (вода, спирт и другие) интенсивными полосами $n\text{-}\pi^*$ и $\pi\text{-}\pi^*$ -электронных переходов с максимумами в области 250 нм.

В результате предварительного исследования проб двух природных вод, а также салициловой и фталевой кислот, взятых для сравнения, было показано, что их УФ-спектры характеризуются интенсивными максимумами в области 250 нм (рис. 5). В связи с этим было логично исследовать возможность использования УФ-спектра для количественного определения концентрации РОУ в воде.

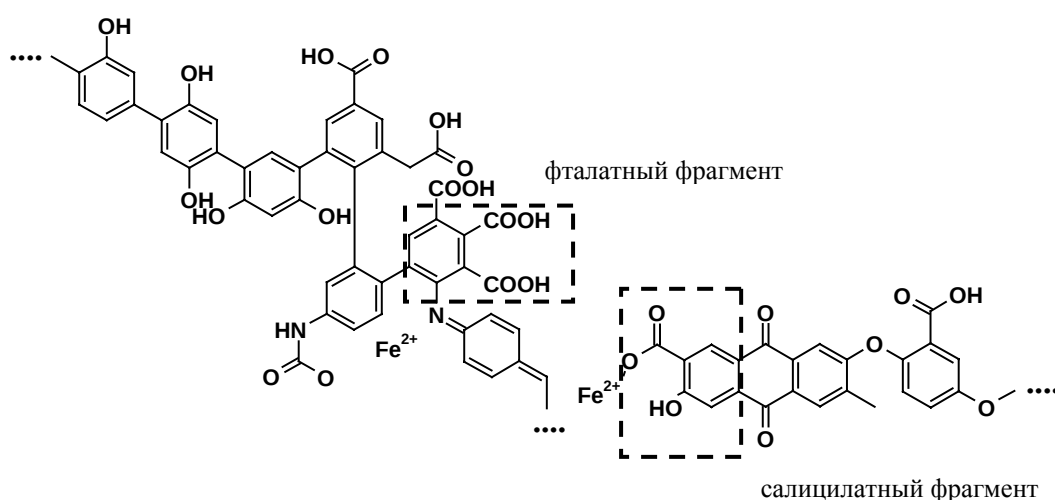


Рис. 4. Структурные фрагменты гуминовых (ГК) и фульвовых (ФК) кислот

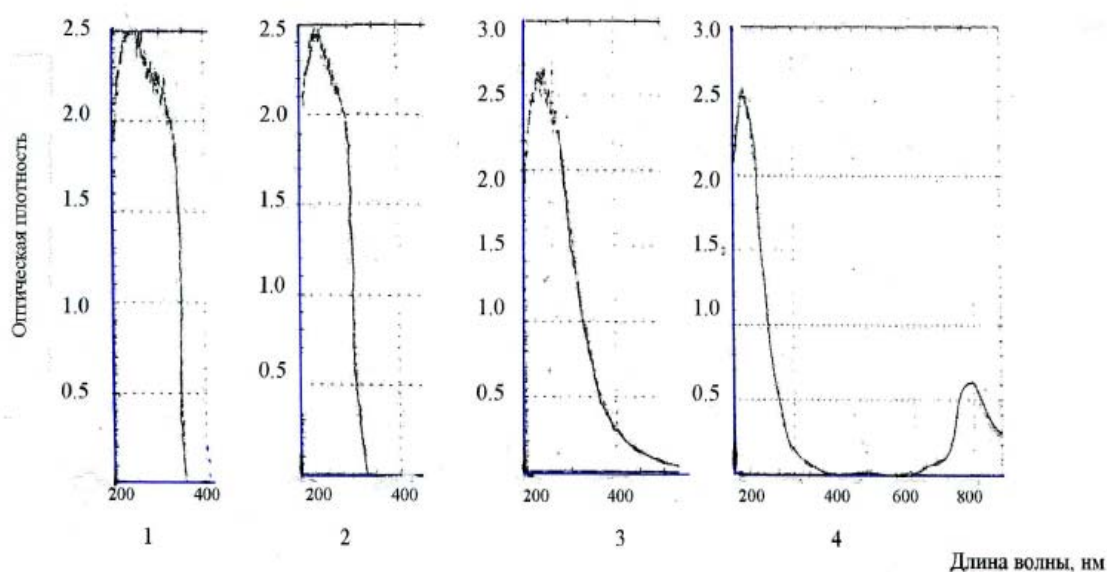


Рис. 5. УФ-спектры водных растворов: 1 — салициловой кислоты, 2 — фталевой кислоты; 3, 4 — исходной воды, поступающей на ВПУ СУГРЭС и РефтГРЭС соответственно

Сущность исследований заключалась в определении зависимости между величиной светопропускания (T , %) в УФ-области спектра, окисляемостью и содержанием общего ООУ в водных модельных растворах салициловой и фталевой кислот, отражающих, как показано на рис. 4, активные центры в структуре ГК и ФК

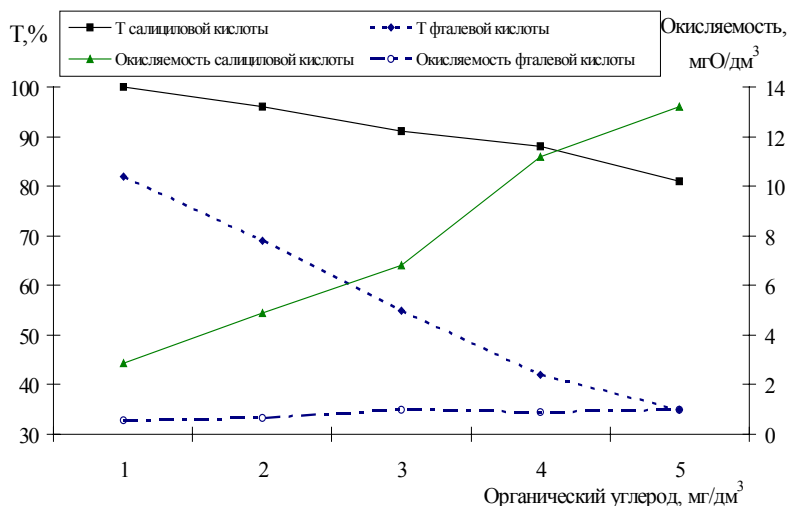


Рис. 6. Изменение светопропускания водных растворов салициловой и фталевой кислот в УФ-области и показателя «Окисляемость»

Из графиков, представленных на рис. 6, видно, что исследованные кислоты имеют различную способность к поглощению в УФ-области и существенно отличаются по окисляемости водных растворов с одной и той же концентрацией органического углерода. Это позволяет сделать вывод, что интенсивность полос $n-\pi^*$ и $\pi-\pi^*$ - электронных переходов в УФ-спектрах гуминовых и фульвовых кислот, со-

державшихся в природных водах, будет пропорциональна концентрации РОУ.

Поскольку в природных водах присутствуют комплексные соединения железа с органическими кислотами, то для определения РОУ и снижения погрешности определения (за счет наличия у комплексов железа собственного поглощения в УФ-области) необходимо создавать условия для диссоциации комплексов. Это достигается путем подбора кратности разбавления пробы, в которой определяется РОУ. Объемная концентрация пробы пропорциональна

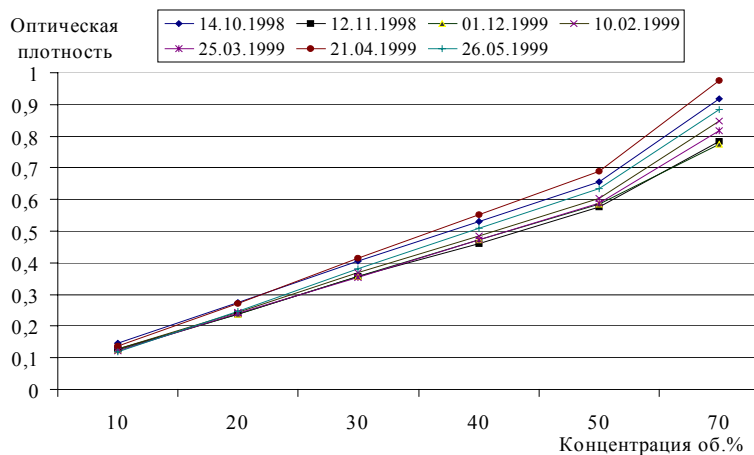


Рис. 7. Зависимость оптической плотности водного раствора ($\lambda = 254$ нм) от объемной концентрации в водном растворе пробы, содержащей ОПР

концентрации РОУ, поэтому зависимость может быть получена между величиной светопропускания (T , %) или оптической плотностью в УФ-области и объемным процентом пробы (% об.), содержащей РОУ, или конкретным значением РОУ в пробе (мг/дм³).

Как видно из рис. 7, увеличение объемной концентрации пробы в водном растворе выше 50 % приводит к нарушению линейной зависимости, что обусловлено

увеличением концентрации соединений железа.

Диапазон, в котором сохраняется линейность графика, зависит от специфики ОПР в конкретной воде и концентрации в ней соединений железа. В табл. 3 приведены результаты определения в исходной воде общего (ООУ), растворенного (РОУ) органического углерода и летучих соединений (ЛОС) природного происхождения.

Содержание ЛОС в пробе определялось по калибровочной зависимости как разница между содержанием РОУ до и после кипячения пробы (упаривание до 50 % от исходного объема). Установлено, что содержание растворенных ОПР природного происхождения находится в пределах 89-98 % от ООУ, а содержание ЛОС изменяется от 0,1 до 10,5 % от РОУ.

Таблица 3

Характеристика поверхностных вод, поступающих на ТЭС

№ п/п	Наименование пробы исходной воды	T ₂₅₄ , %	Fe, мг/дм ³	ООУ, мг/дм ³ (ВТМ)	РОУ, мг/дм ³ (УФМ)	ЛОС, мг/дм ³ (УФМ)
1	Рефтинская ГРЭС	1,52	0,15	18,09	17,0	1,9
2	Среднеуральская ГРЭС	1,01	0,60	22,01	19,53	0,37
3	Серовская ГРЭС	0,4	0,42	19,85	19,45	1,29
4	Свердловская ТЭЦ	41,84	0,05	15,52	14,80	0,02

Наиболее распространенный способ удаления ОПР из исходной воды – коагуляция с использованием различных реагентов. После коагуляции ОПР находятся в коллоидном, растворенном виде и адсорбированы на поверхности грубодисперсной фазы. Для оценки эффективности процесса коагуляции наибольший интерес представляет исследование светопропускания в видимой области спектра (430-630 нм).

По результатам лабораторных исследований процесса коагуляции и химического контроля проб, отобранных в эксплуатационном режиме работы оборудования, был сделан вывод, что при минимальном содержании грубодисперсных и коллоидных примесей значение Т максимально и находится в пределах 90-100 %. Так, из табл. 4 видно, что значение величины светопропускания в воде после коагуляции составляет 88-92 %, после механических фильтров – 89-95 %, а в обессоленной воде – 100 %, то есть качество осветленной воды нестабильно по содержанию дисперсных частиц.

Для контроля и регулирования процесса коагуляции целесообразно использовать автоматический контроль. На рис. 8 представлены результаты контроля качества воды по величине светопропускания с использованием прибора автоматического контроля АЖТ-94/4.

По ним видно, что система сбора информации позволяет оперативно наблюдать и корректировать не только процесс очистки воды, но и работу самого прибора, включающую стадию автоматической промывки (снижение величины Т до 65 % обусловлено изменением реагентного режима, а снижение до 90 % – увеличением нагрузки).

Таблица 4

Результаты оценки качества коагулированной, осветленной и обессоленной воды по величине светопропускания

Величина светопропускания, %		
Вода после коагуляции	Осветленная вода (после механических фильтров)	Обессоленная вода
87,8	93,2	99,4
91,0	93,1	99,8
88,9	89,2	99,8
90,2	94,3	99,7
89,8	94,2	99,8
90,1	94,3	99,8
91,6	94,7	9,8
92,0	95,1	99,9
91,6	94,8	99,8
92,4	94,3	99,8
90,6	90,8	100-
91,0	91,1	99,9
92,8	93,4	100

T, %

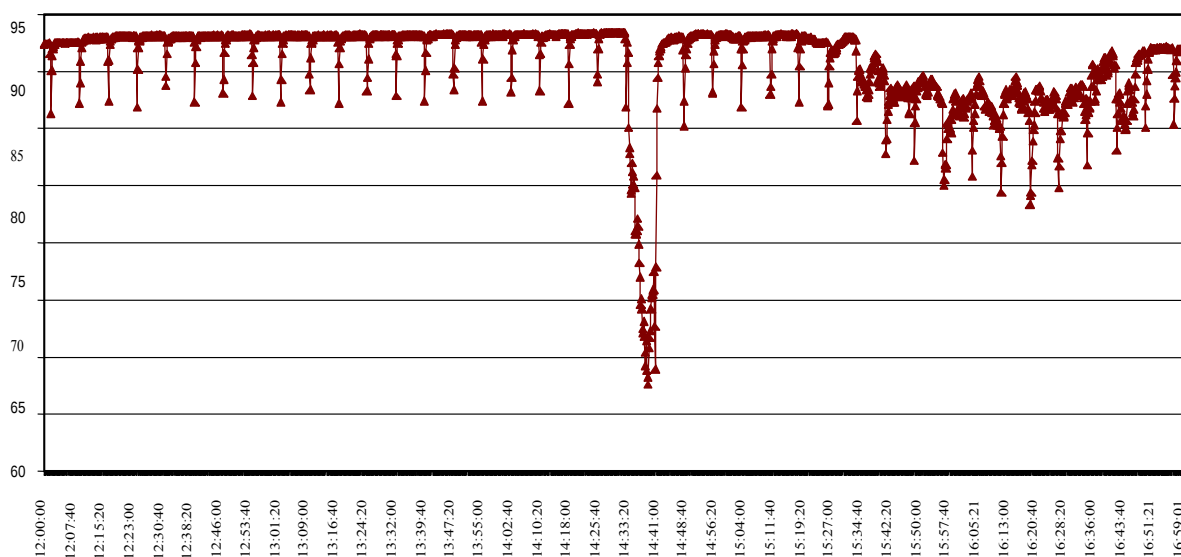


Рис. 8. Результаты технологического контроля качества коагулированной воды по величине светопропускания (T) (Чайковская ТЭЦ)

На стадии предочистки удаляется 50-70 % ОПР, а остальные – только в схемах обессоливания по технологии ионного обмена на анионитах I ступени. На поверхности анионита происходит адсорбция неорганических ионов и органических веществ.

На рис. 9 представлены результаты анализа воды после анионитового фильтра I ступени по показателю окисляемости и величине светопропускания.

ния, измеренной при $\lambda = 254$ нм (Т), по которым видно, что в конце фильтроцикла окисляемость увеличивается, а величина Т снижается.

Снижение величины Т в процессе фильтроцикла можно объяснить образованием нейтральных комплексных соединений железа в процессе Н-катионирования, что приводит к «проскоку» анионов органических кислот в очищенную воду и нестабильности воды по содержанию ОПР. Для того чтобы снизить величину негативного эффекта, необходимо на стадии предочистки максимально удалять ОПР и соединения железа (или алюминия), которые способны сорбироваться на катионите и образовывать комплексные соединения с ОПР, в том числе нейтральные комплексы.

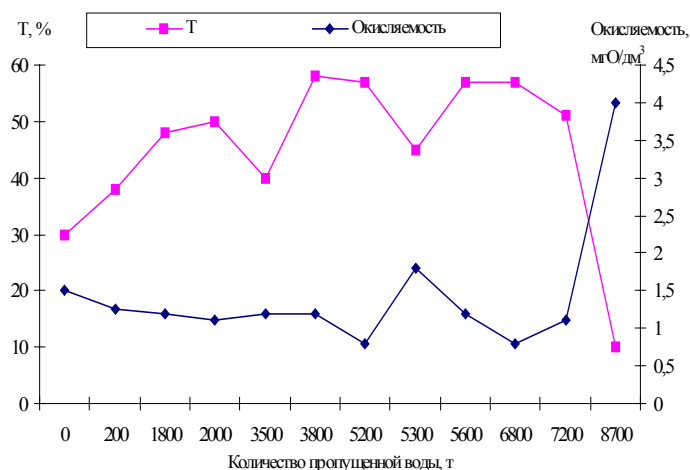


Рис. 9. Сопоставительные результаты оценки качества воды анионитового фильтра I ступени

Таким образом, доказано, что величина светопропускания в УФ-области может быть использована для оперативного контроля содержания ОПР в обессоленной воде. Это более простой метод контроля содержания ОПР, чем общепринятое определение перманганатной окисляемости. Кроме того, имеются приборы автоматического контроля величины светопропускания в видимой и УФ-области спектра как отечественного, так и импортного производства.

Количественно определить РОУ в воде до и после ионного обмена можно с использованием установленной линейной зависимости между содержанием РОУ и величиной Т, измеренной при длине волны 254 нм (см. рис. 7). Кроме этого, для получения калибровочной зависимости можно использовать фталат калия, поскольку содержание ООУ (РОУ) можно рассчитать. Это соединение имеет собственное поглощение при 254 нм и используется для градуировки анализаторов ООУ, а также для получения стандартных растворов для определения ХПК.

В табл. 5 представлены результаты расчета корректирующих коэффициентов для определения РОУ в исходной и Н-катионированной водах (ВПУ СУГРЭС) спектрофотометрическим методом с использованием градуировочной зависимости по фталату калия.

На рис. 10 представлены результаты определения содержания ООУ (высокотемпературный метод) и РОУ (спектрофотометрический метод) в обессоленных водах СУГРЭС и РефтГРЭС.

Результаты исследования зависимости оптической плотности водных растворов от содержания растворенного органического углерода

Оптическая плотность растворов	РОУ (без учета разбавления раствора), мг/дм ³			К(исх.в)	К(н-кат.в)
	фталат калия	исх. вода	н-кат. вода		
0,02	0,24	0,28	0,10	0,84	2,35
0,04	0,47	0,56	0,20	0,83	2,36
0,06	0,70	0,84	0,30	0,83	2,36
0,08	0,94	1,12	0,40	0,83	2,36
0,09	1,05	1,26	0,45	0,84	2,37

Примечание: Пример расчета значения корректирующего коэффициента:

$$K_{\text{исх.в}} = 0,7/0,84 = 0,83 \text{ (для } D = 0,06).$$

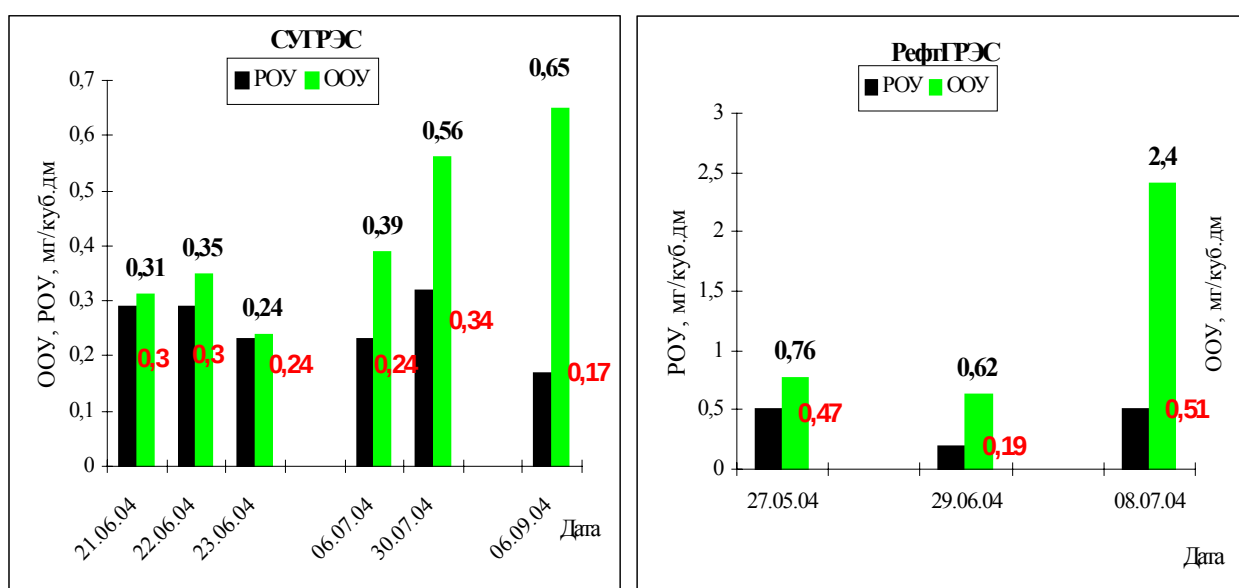


Рис. 10. Характеристика содержания ООУ и РОУ в воде после анионитовых фильтров I ступени в схемах обессоливания

Из них видно, что в воде после анионитовых фильтров I ступени (в схемах обессоливания) содержание продуктов деструкции ионитов существенно увеличивается в период «цветения» водоисточника, а также увеличивается содержание природных ОНР. Как известно, причинами вторичного загрязнения очищаемой воды являются как «отравление» природными ОНР, так и неоптимальные условия регенерации ионообменной смолы.

Решить проблему вторичного загрязнения очищенной воды можно путем разработки профилактических мероприятий на ВПУ, которые включают контроль органической нагрузки на ионит и контроль состояния ионитов. Для расчета органической нагрузки на анионит целесообразно использовать экспресс-метод определения РОУ до и после анионитового фильтра (Пат. 2293968 от 20.02.07).

В результате поиска оценочного критерия чистоты ионита был разработан новый дополнительный критерий – величина изменения диэлектрической проницаемости (ДП) смолы (Пат. 2207560 от 08.11.03). Изменение величины ДП ионита, используемой для оценки его чистоты, определяется по

разности между результатами измерения емкости специально изготовленной ячейки до и после заполнения ее ионитом. Благодаря простоте и малым временным затратам на контроль состояния ионообменных смол по ДП представляется возможным своевременно решить вопросы ее восстановления, а следовательно, предотвратить ухудшение качества очищаемой воды.

Таким образом, разработанные на основании результатов экспериментальных исследований способы спектрофотометрического контроля вод тракта блоков СКД и ВПУ позволяют расширить и оптимизировать существующую схему контроля, что обеспечивает повышение эффективности водоподготовки ТЭС.

Технологические принципы контроля за процессами подготовки воды и корректировки водных режимов основаны на оценке свойств водных растворов, которые проявляются при взаимодействии с ультрафиолетовым излучением (поглощение или рассеивание светового потока).

Четвертая глава посвящена разработке и обоснованию методологии контроля процесса водоподготовки (схема умягчения) при содержании в исходной воде техногенных ОНР.

В отраслевых документах рекомендуется при увеличении содержания ОНР в исходной воде осуществлять корректировку реагентного режима в целях снижения их негативного влияния на производственные процессы. Наличие техногенных ОНР в исходной воде можно оценить, сопоставив показатели, полученные перманганатным методом (окисляемость) и бихроматным методом (ХПК – химическое потребление кислорода).

Однако, как отмечалось, определение этих показателей является трудоемким и длительным процессом, не пригодным для организации оперативного контроля. Кроме этого, для использования приборов автоматического контроля ООУ необходимо предварительное обоснование типа прибора и получение определенных корреляционных зависимостей между измеряемым параметром и содержанием ООУ в конкретном водном объекте. Решение этой проблемы представляется возможным после предварительной оценки свойств ОНР, присутствующих в производственных водах ТЭС. Методологический подход к контролю ОНР отрабатывался на Первоуральской ТЭЦ (ПТЭЦ), водоподготовка которой проходит в две стадии: предочистка (известкование с коагуляцией) и Na-катионирование.

К числу основных проблем водоподготовки ТЭС относится образование отложений в дренажной системе Na- катионитовых фильтров и на внутренней поверхности энергетических котлов. Так, по результатам фазового анализа, выполненного с использованием прибора C-mat-5500, было определено, что отложения, отобранные из дренажной системы Na-катионитовых фильтров, содержат около 53,3 % ОНР и 46,7 % карбоната кальция.

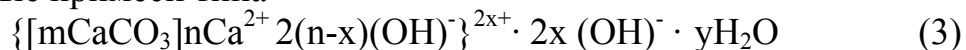
Наличие в отложениях карбоната кальция свидетельствует о том, что карбонат кальция, образующийся в процессе известкования с коагуляцией, не осаждается в осветлителе. Можно предположить, что это обусловлено либо влиянием ОНР, содержащихся в исходной воде, на скорость формирования твердой фазы (ингибирование процесса образования карбоната кальция), ли-

бо нестабильностью качества воды после коагуляции (например, при нарушении гидратного режима).

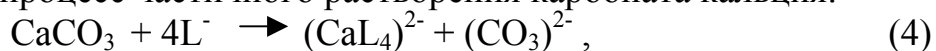
Для анализа и установления причин образования отложений в дренажной системе катионитовых фильтров изучен состав исходной воды, поступающей на ВПУ, проведены исследования оценки влияния некоторых реагентов на формирование осадка и очистку воды от ОПР, а также проведен расширенный лабораторный контроль процесса предварительной очистки воды.

Было установлено, что «окисляемость» исходной воды изменяется в пределах от 5 до 9 мгО/дм³, а показатель ООУ – от 5 до 49 мг/дм³. В свою очередь, после коагуляционной обработки и фильтрования воды происходит снижение содержания железа на 80-90 %, окисляемости – на 28-54 %. Показатель ООУ уменьшается на 20-60 %. Кальциевая жесткость увеличивается, карбонатная щелочность колеблется в пределах от 0,5 до 1,1 мг-экв/дм³.

Специальное добавление карбонатов и фосфатов натрия в коагулируемую воду в целях формирования осадка карбоната и фосфата кальция не приводит к образованию грубодисперсной фазы, но увеличивает сухой остаток очищенной воды. Это означает, что кальций удерживается в растворе, образуя коллоидные примеси типа



Кроме этого, ОПР способны к комплексообразованию с кальцием, поэтому имеет место процесс частичного растворения карбоната кальция:

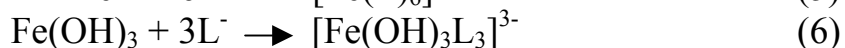
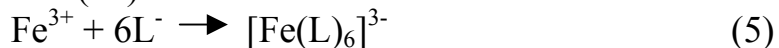


где L^{-} – ОПР, которые в щелочной среде имеют отрицательный заряд.

Поскольку заряд гранулы коллоида карбоната кальция положительный, то может происходить адсорбция $(\text{CaL}_4)^{2-}$ на поверхности раздела фаз.

Таким образом, в процессе известкования с коагуляцией ОПР образуют с кальцием как растворимые, так и коллоидные системы, поэтому содержание кальция в воде после коагуляции увеличивается.

Наряду с кальцием, ОПР могут взаимодействовать и с катионами железа (III), которые вводятся в виде сернокислого железа (коагулянта) в исходную воду и окисляются до железа (III):



Если ОПР способны к комплексообразованию с железом, то при повышении их концентрации в исходной воде целесообразно увеличить дозу коагулянта. Это позволит повысить эффективность очистки воды от ОПР, соединений железа, карбонатов кальция. Однако в лабораторных исследованиях и промышленных экспериментах установлено, что ОПР, поступающие на ВПУ с исходной водой, не образуют растворимых комплексных соединений с железом ($K_{\text{комп}} \leq 1$), но влияют на свойства шламowego фильтра. Поэтому традиционная корректировка дозы коагулянта (увеличение дозы при увеличении содержания ОПР) не приводит к снижению ОПР, а лишь увеличивает сухой остаток очищенной воды.

На основании проведенных исследований было рекомендовано:

- включение в схему технологического контроля процесса водоподготовки частотного регулятора привода (ЧРП), позволяющего в непрерывном режиме производить дозировку извести, коагулянта и контролировать расход реагентов с корректировкой расхода извести по значению pH, измеряемому прибором автоматического контроля в зоне смешивания реагентов;

- проведение реконструкции механических фильтров (МФ) для увеличения высоты фильтрующего слоя, что позволит повысить эффективность удаления микродисперсных примесей.

Благодаря выполнению указанных мероприятий был увеличен межпромывочный период оборудования и в 2 раза снижена динамика образования отложений в катионитовых фильтрах и энергетических котлах.

В целях совершенствования системы контроля и создания АСУ ТП ВПУ разработан способ контроля загрязненности механического фильтра соединениями железа (Пат. 22245578 от 15.07.02), который позволяет оценить загрязненность фильтрующей загрузки МФ соединениями железа (III). Способ основан на линейной зависимости, установленной экспериментально, между изменением содержания соединений железа в пробах воды, отобранных до и после механического фильтра, и изменением величины светопропускания (рис. 11), измеренной на приборе КФК-2 при длине волны 430 нм, в этих же пробах воды.

Одно из основных преимуществ предложенного спектрофотометрического метода контроля в том, что оптимальную величину интегрального критерия качества очищенной воды – T_{430} – можно определить в ходе лабораторных экспериментов, а оперативный технологический контроль осуществлять как с использованием приборов автоматического контроля (например, АЖТ-94/4С), так и «ручным» методом, используя широко распространенные приборы лабораторного контроля КФК.

На рис. 12 представлена принципиальная схема технологического контроля, а в табл. 6 – результаты промышленного эксперимента с использованием прибора АЖТ-94/4С совместно с приставкой «Поток-4» (для измерения 4 потоков).

Из представленных данных видно, что сухой остаток в умягченной воде зависит от дозы коагулянта на предочистке и адсорбции соединений железа на катионите: при дозе коагулянта $0,7 \text{ мг-экв/дм}^3$ содержание железа в осветленной воде составило 67 мкг/дм^3 . При этом реагентном режиме ад-

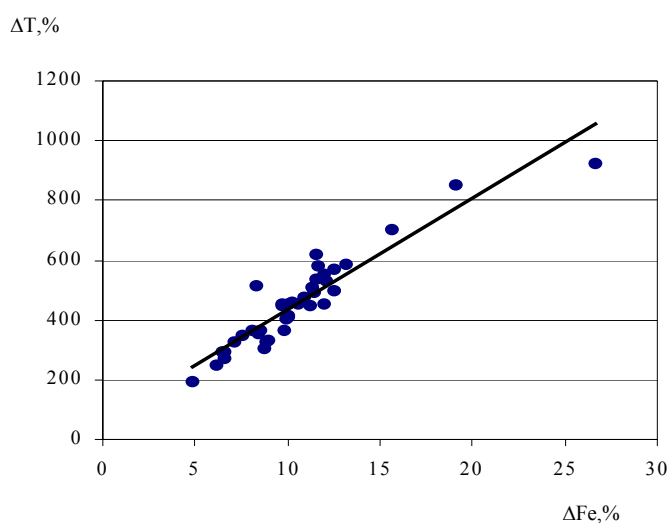


Рис. 11. Зависимость между изменением содержания соединений железа в воде до и после механического фильтра (ΔFe) и изменением величины светопропускания T (ΔT)

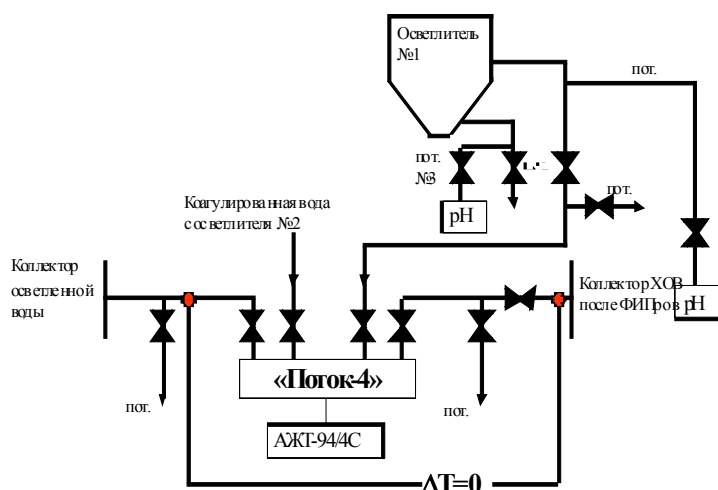


Рис. 12. Принципиальная схема технологического контроля на ВПУ при проведении промышленных экспериментов

сорбция соединений железа на катионите минимальна, а изменение величины светопропускания до и после катионитовых фильтров (ΔT) составляет 2,2 %. Сухой остаток умягченной воды – 130 мг/дм^3 , то есть по сравнению с исходной водой его относительное увеличение составило 6 мг/дм^3 . В условиях неоптимального реагентного режима (доза коагулянта $0,5 \text{ мг-экв/дм}^3$)

величина сухого остатка составила 192 мг/дм^3 , то есть по сравнению с исходной водой ее относительное увеличение составило 34 мг/дм^3 .

Минимальная продувка энергетического котла среднего давления в этих условиях должна быть 2,4 % и 1,6 % соответственно (доля ХОВ в составе ПВ составляла 0,6).

Таблица 6

Результаты промышленного эксперимента: процесс известкования с коагуляцией и гидратный режим

Наименование пробы	Доза коагулянта $0,5 \text{ мг-экв/дм}^3$				Доза коагулянта $0,7 \text{ мг-экв/дм}^3$			
	РОУ, мг/дм^3	$\Delta T^*, \%$	Железо, мкг/дм^3	Сухой остаток, мг/дм^3	РОУ, мг/дм^3	$\Delta \% T^*,$	Железо, мкг/дм^3	Сухой остаток, мг/дм^3
Исходная вода	8,0		649	158	7,5		434	124
Коагулированная вода (после осветлителя)			1181	203			480	160
Осветленная вода (после механических фильтров)	6,1		295	175	5,3		67	178
Умягченная вода (после катионитовых фильтров)	7,3	4,7	120	192	5,3	2,2	33	130

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать нижеследующие выводы:

1. ОПР, присутствующие в исходной воде ТЭС, замедляют процесс формирования карбоната кальция. Выявлен эффект повышенной растворимости карбоната кальция в щелочной среде при использовании в качестве коагулянта сернокислого железа (II).

2. Критерием эффективности процесса предочистки может служить величина светопропускания, измеренная при длине волны 430 нм в пробах воды до и после катионитовых фильтров (ΔT). При оптимальном технологическом режиме $\Delta T=0$. Допустимые отклонения должны определяться в процессе анализа свойств исходной воды и существующей технологии её очистки.

3. Между изменением величины светопропускания, измеренной при длине волны 430 нм до и после механических фильтров, и изменением содержания взвешенных веществ (железа) в этих потоках существует линейная зависимость, которая может быть использована для оптимизации процесса очистки воды от взвешенных примесей.

4. Использование приборов, основанных на спектрофотометрическом методе, позволяет оперативно оценивать стабильность качества умягченной воды и корректировать процесс водоподготовки в целях обеспечения стабильности качества ХОВ, снижения накипеобразования и уменьшения величины продувки энергетических котлов.

Методики, разработанные в процессе исследований, позволили усовершенствовать систему технологического контроля в схемах умягчения вод на Первоуральской ТЭЦ. Технологические принципы контроля водоподготовки, так же как в главе 3, основаны на контроле свойств водных растворов, но применительно к Первоуральской ТЭС эти свойства определяются особенностями взаимодействия ОНР с неорганическими примесями, содержащимися в производственной воде.

Глава пятая посвящена разработке методологии контроля и управления процессами подготовки воды в открытых схемах теплоснабжения.

Нагревание подпиточной воды, предназначенной для использования в открытых схемах теплофикационного комплекса ТЭС (ТФК ТЭС), может приводить к существенному ухудшению ее качества, а именно: увеличению цветности, появлению запаха, ухудшению эпидемиологических показателей, наряду с образованием на внутренней поверхности теплосилового оборудования отложений, включающих соединения алюминия, кремния, магния и железа.

Известно, что значение органолептических показателей (запах, привкус, цветность и мутность) зависит от качества и количества содержащихся в воде ОНР. Причем запах воды может быть обусловлен развитием микроорганизмов, использующих природные ОНР в качестве питательной среды.

Для выяснения причин и природы образования отложений в оборудовании ТЭС, которая осуществляет подготовку подпиточной и сетевой воды по технологии ингибирования, выполнены следующие работы:

- определен фазовый состав отложений;
- проанализированы методики аналитического контроля состава воды;
- выполнены промышленные эксперименты, направленные на анализ состава, свойств производственных вод и их влияния на состояние оборудования.

Из анализа результатов установлено, что существует две основные причины образования отложений: неадекватное определение содержания алюми-

ния в воде после коагуляции и несвоевременная корректировка дозы ингибитора.

На рис. 13 представлены результаты сопоставительных анализов содержания алюминия в пробах воды после коагуляционной обработки сернокислым алюминием. Из данных видно, что имеет место существенное расхождение в определении содержания алюминия разными методами химического анализа. Это обусловлено тем, что катионы алюминия взаимодействуют с ОПР, образуя соединения различного стехиометрического состава, в том числе и комплексные ионы. Стехиометрический состав образующихся соединений зависит от дозы коагулянта. В существующей методике (с алюминоном) при наличии фульвовых кислот предусмотрено определение алюминия про-

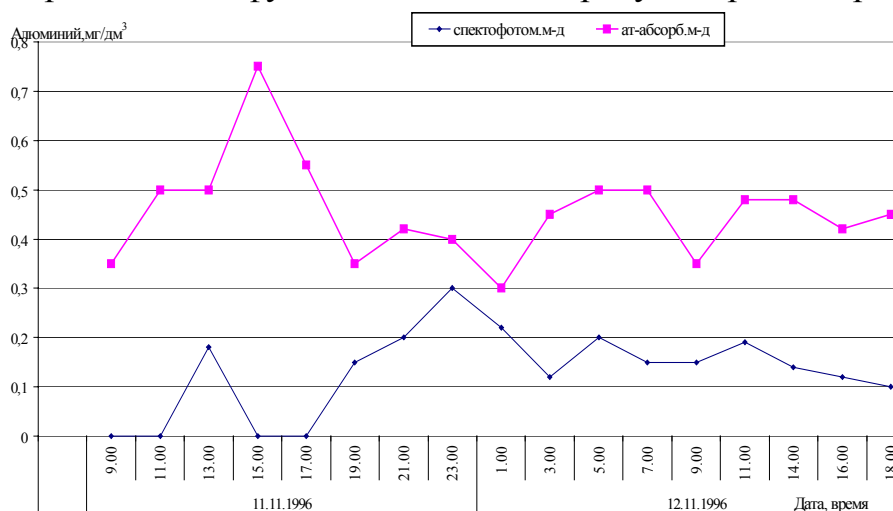


Рис. 13. Содержание алюминия по результатам анализа спектрофотометрическим и атомно-абсорбционным методом анализа алюминия

водить после специальной пробоподготовки. Поскольку условия пробоподготовки не конкретизированы, то есть не учтены концентрация, свойства фульвовых кислот и другие, то ее, как правило, не делают.

Неполное удаление соединений алюминия из воды, обусловленное недостаточным аналитическим контролем стадии коагуляционной обработки воды, исключающее корректировку этого процесса, приводит к форсированному образованию сложных отложений при последующем нагреве воды, так как соединения алюминия вовлекают в процесс совместного гидролиза соединения кремния и магния.

Ингибиторы накипеобразования (комплексоны) добавляют в небольшом количестве (1-2 мг/дм³ по активному веществу) для снижения накипеобразующих и коррозионных свойств водных растворов. Эти органические реагенты (товарные продукты) содержат 12-20 % органического углерода в своем составе и являются смесью полифосфоновых кислот, а также содержат неорганические фосфат-ионы.

Свойства ингибиторов по отношению к кальцию изучены в ряде научных работ ИРЕА, однако нет однозначных критериев, позволяющих выбрать оптимальную дозу комплексона с учетом состава и свойств примесей в производственных водах, поэтому оптимальную дозу реагента устанавливают по результатам предварительных лабораторных испытаний.

Для контроля и корректировки оптимальной дозы ингибитора в подпиточной и сетевой воде в первую очередь необходима методика его количест-

венного определения в товарном продукте, модельных растворах и производственных водах, поэтому была разработана и аттестована методика определения ингибитора ИОМС-1, представленная в настоящей работе. Сущность методики контроля содержания ингибитора ИОМС-1 заключается в обработке пробы воды, содержащей ингибитор ИОМС-1, персульфатом аммония, последующем ее нагреве до разложения реагента до ортофосфат-ионов. Массовую концентрацию ингибитора рассчитывают по разнице ортофосфат-ионов до и после разложения.

В процессе лабораторных исследований и промышленных экспериментов было выявлено, что образованию отложений в оборудовании способствуют:

- повышенное содержание свободных фосфат-ионов в товарном реагенте: более 1% (массовых), поэтому были скорректированы требования к товарному продукту;

- методологические проблемы: для конкретного состава воды должна быть выбрана определенная объемная концентрация пробы в анализируемом растворе, поскольку образующийся полилигандный комплекс, который включает природные ОПР и реагент ИОМС, может быть достаточно прочным и не разрушаться полностью до неорганических фосфатов в условиях метода разложения. Уменьшение объемной концентрации комплекса способствует увеличению его диссоциации, поэтому при определенном объемном проценте ингибитора в производственной воде будет обеспечена воспроизводимость результатов.

В настоящей работе также представлялось важным оценить свойства ингибитора ИОМС-1 по отношению к продуктам коррозии железа, учитывая следующие факты:

а) известно, что растворимые железо-органические соединения увеличивают цветность воды (нормируемый показатель);

б) при нагревании растворенные примеси железа переходят в коллоидные или грубодисперсные взвеси.

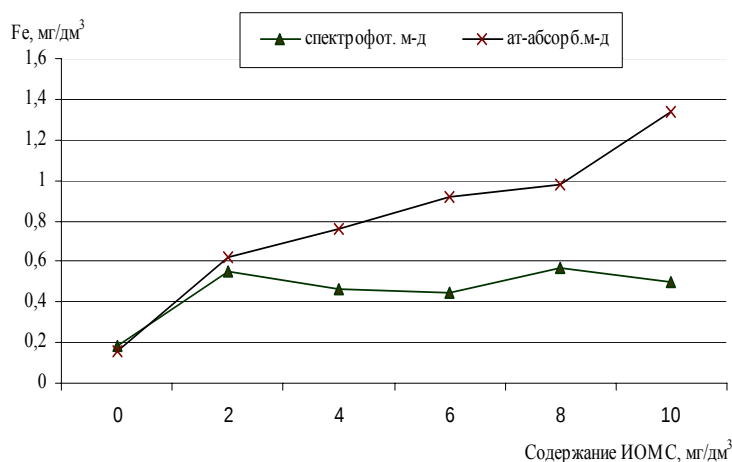


Рис.14. Результаты спектрофотометрического и атомно-абсорбционного методов химического анализа содержания железа при различной концентрации ИОМСа в пробе

Для оценки комплексобразующих свойств модельных водных растворов, содержащих природные ОПР и разные дозы ингибитора ИОМС-1, использовали разработанную методику.

Было доказано, что с продуктами коррозии железа ингибитор ИОМС-1 образует прочные комплексные соединения, поэтому содержание железа более надежно определяется при использовании атомно-абсорбционного метода (рис. 14).

Результаты исследования содержания железа и значения коэффициента $K_{\text{коп}}$ в водных растворах ингибитора ИОМС-1 при концентрациях 0; 2 и 4 мг/дм³ приведены на рис. 15. Водный раствор приготовлен на водах ТЭС, содержащих неорганические и органические (природные) примеси. Из рис. 15 видно, что с увеличением дозы ингибитора в «модельном» растворе значение коэффициента $K_{\text{коп}}$ увеличивается, то есть возрастает его способность к образованию растворимых комплексных соединений с катионами железа (III). Однако активность ингибитора ИОМС-1 в природных водах изменяется существенно: значения $K_{\text{коп}}$ находятся в диапазоне от (- 0,2) до 8,0. Это ещё раз подтверждает образование полилигандных комплексных соединений, состав которых зависит от дозы ингибитора ИОМС-1 и специфики свойств природных органических примесей.

Таким образом, установлено, что для снижения накипеобразования и коррозионного воздействия воды на теплосиловое оборудование необходимо иметь достоверное аналитическое обеспечение контроля как стадий водоподготовки, так и качества производственных вод (деаэрированной, подпиточной и сетевой).

Полученные результаты исследований позволили организовать контроль процесса водоподготовки и расхода ингибитора, что обеспечило снижение накипеобразующей способности подпиточной, сетевой воды на всех предприятиях, где было внедрено применение ИОМС-1: Среднеуральская ГРЭС, Верхне-Тагильская ГРЭС, Нижне-Туринская ГРЭС, Серовская ГРЭС, Ново-Свердловская ТЭЦ, Свердловская ТЭЦ, Богословская ТЭЦ, Красногорская ТЭЦ, Артемовская ТЭЦ, Свердловские тепловые сети, Чайковская ТЭЦ.

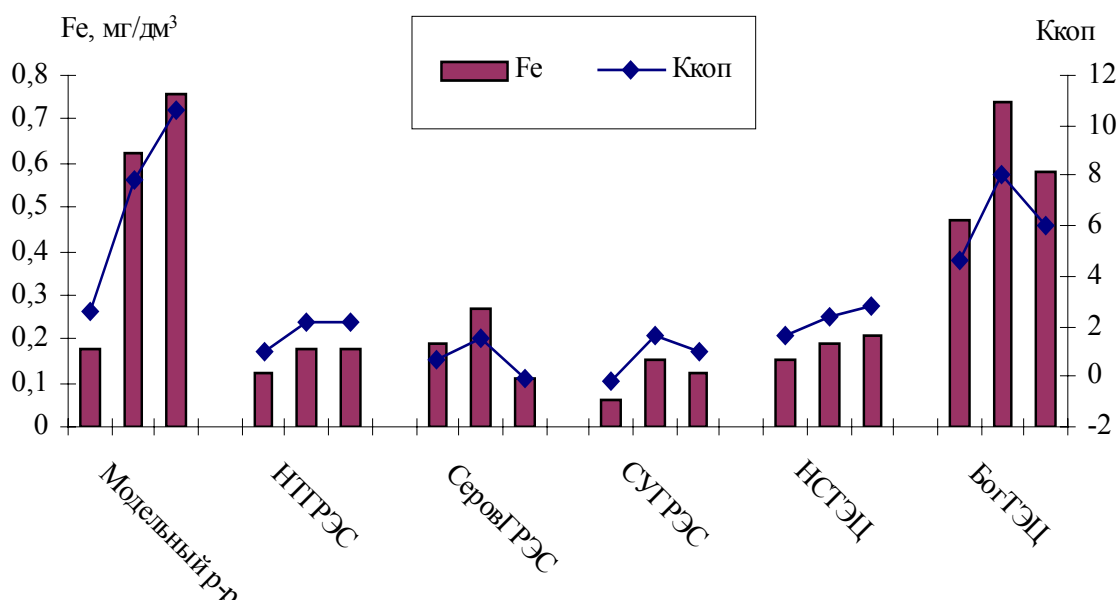


Рис. 15. Содержание растворимого железа и величина $K_{\text{коп}}$ в водных растворах с концентрацией ингибитора ИОМС-1: 0; 2 и 4 мг/дм³

Однако применение ингибитора не исключает накипеобразования, если температура нагрева воды выше допустимого предела. Так, например, темпе-

ратура греющего пара, поступающего в подогреватели греющей воды – ПГВ (ТФК Среднеуральской ГРЭС), составляет 270 °С (что соответствует температуре насыщения 169 °С), в то время как установлено, что при температуре более 130 °С возможно разложение более 30 % ингибитора (от введенной дозы). Для снижения загрязненности ПГВ и обеспечения более эффективной работы этого оборудования автором предложено дополнительно использовать ультразвуковой аппарат. В связи с этим актуален поиск критериев оценки воздействия аппарата на изменение свойств водных растворов.

Поскольку воздействие аппарата на отложения предполагает увеличение грубодисперсной фазы в дисперсионной среде, то для оптимизации режима работы аппарата предложено использовать в качестве критерия его эффективности изменение величины светопропускания до и после воздействия. При воздействии ультрафиолетового или лазерного облучения состав дисперсионной среды не меняется, но изменяются структурные свойства растворителя, то есть воды. В этом случае оценить изменение структурных свойств воды можно с помощью ИК-спектрометрической методики, разработанной академиками В.К. Кондратовым и Ю.А. Рахманиным.

В качестве объектов исследования выбраны воды питьевого качества с разным составом органических и неорганических примесей и различной способностью к накипеобразованию (см.табл. 1): горводопроводная и две воды из артезианских скважин: №1 и № 2. УФ- и лазерное облучение проведено в производственных условиях. Цель исследования – оценить изменение свойств двух компонентов раствора: растворителя (воды) и примесей (неорганических и органических).

С помощью этой методики была определена интенсивность полос поглощения валентных (J_v), деформационных (J_g) и либрационных (J_l) колебаний молекулы воды и полуширины её полос поглощения (ПП) валентных ($1/2\nu_v$), деформационных ($1/2\nu_g$) и либрационных ($1/2\nu_l$) колебаний в ИК-спектрах, а также были рассчитаны отношения $J_v/1/2\nu_v$, $J_q/1/2\nu_q$ и $J_l/1/2\nu_l$. Значения параметров приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты ИК-спектроскопического исследования различных типов вод до и после воздействия УФ- и лазерного облучения

Номер пробы	Характеристика пробы	$J_v/1/2\nu_v$, см/см	$J_q/1/2\nu_q$, см/см	$J_l/1/2\nu_l$, см/см
1	«Скважина № 1» – исходная вода	2,13	2,46	2,03
2	«Скважина №1» – вода, подвергнутая обработке лазером	2,16	2,82	2,13
3	«Скважина №1» – вода, подвергнутая лазерной обработке и УФ-облучению	2,24	3,02	2,22
4	«Скважина №2» – исходная вода	2,01	2,45	1,96
5	«Скважина №2» – вода после УФ-облучения	2,24	2,73	2,07
6	Водопроводная (г. Екатеринбург)	2,02	2,48	2,11

Полуширины ПП ($1/2\nu$) связаны со структурной упорядоченностью (СУ) вод: $1/2\nu_{\text{в}}$ – в направлении валентных колебаний (по горизонтали), $1/2\nu_{\text{г}}$ – в плоскости деформационных колебаний (по вертикали), $1/2\nu_{\text{л}}$ – в плоскости либрационных колебаний (ассоциатов). Отношения $J_{\text{в}}/1/2\nu_{\text{в}}$, $J_{\text{г}}/1/2\nu_{\text{г}}$ и $J_{\text{л}}/1/2\nu_{\text{л}}$ отражают перенос заряда (ПЗ) в воде в различных направлениях – по горизонтали, вертикали и в ассоциатах.

Наибольшие параметры ПЗ по вертикали ($J_{\text{г}}/1/2\nu_{\text{г}}$) и ПЗ в составе ассоциатов ($J_{\text{л}}/1/2\nu_{\text{л}}$) имеет проба № 3, подвергнутая лазерной обработке и УФ – облучению (см. табл. 7): 3,02 см/см и 2,22 см/см соответственно.

Проведенные ИК-спектроскопические исследования позволили установить, что под воздействием УФ-облучения изменяются свойства растворителя (воды), а следовательно, должны изменяться и свойства примесей.

При исследовании способности трех типов вод к образованию осадка карбоната кальция наряду с параметрами ИК-спектроскопии ($\Delta\chi$, СУ и ПЗ) были использованы также ΔT_{254} и ΔpH .

Расчетным путем установлено, что пробы № 1 и № 6 имеют невысокую скорость накипеобразования, так как карбонатные индексы ($I_{\text{к}}$) равны соответственно 3,26 и 2,55, тогда как проба № 4 имеет большую склонность к образованию кристаллов CaCO_3 , поскольку ее $I_{\text{к}}$ равен 4,12.

Для подтверждения расчетных результатов был проведен лабораторный эксперимент: исследуемую воду упаривали на $\sim 50\%$, затем охлаждали и доводили ее объем дистиллированной водой до исходного. В пробах исходной и кипяченой воды определяли: величину светопропускания (Т), электропроводность (χ) и ООУ. Значения ΔT_{254} и $\Delta\chi$ вычисляли по разнице значений этих показателей до и после нагревания проб. Исследования вели без добавки карбоната кальция, так как сначала исследовали его образование в исходных водах, используя новый критерий ΔT .

Экспериментальные данные (табл. 8) подтверждены результатами, полученными расчетным путем.

Таблица 8

Результаты экспериментальных исследований вод

№ п/п	Наименование пробы	ΔT_{254} , %	$\Delta\chi$, мкМ/см	$K_{\text{коп}}$	ООУ, мг/дм ³	$K_{\text{коп}}/\text{ООУ}$
1	«Скважина №1» – исходная вода	3,4	97	63,5	1,97	32,2
2	«Скважина №1» – вода, подвергнутая обработке лазером	2,5	87	-9,5	1,97	-4,82
3	«Скважина №1» – вода, подвергнутая лазерной обработке и УФ-облучению	2,9	92	55,5	1,97	28,2
4	«Скважина №2» – исходная вода	26,4	127	24,5	3,0	8,19
5	«Скважина №2» – вода после УФ-облучения	34,6	134			
6	Водопроводная (г. Екатеринбург)	7,5	66	102	7,2	14,2

Так, проба №4, имеющая наибольший карбонатный индекс ($I_k = 4,2$), отличается большими значениями ΔT_{254} , $\Delta \chi$ и меньшим ПЗ по горизонтали, вертикали и в ассоциатах, чем проба № 1 или проба № 6.

Электропроводимость пробы № 1, имеющей значение I_k намного большее, чем у пробы № 6, снижается после ее кипячения, что свидетельствует о формировании кристаллов карбоната кальция в воде.

Однако процесс кристаллизации задерживается (ингибируется) углеродсодержащими соединениями, присутствующими в воде, поэтому значение ΔT_{254} в пробе №1 после кипячения в 2 раза меньше, чем у пробы № 6 (см. табл. 8), хотя общее содержание органического углерода составляет $1,97 \text{ мг/дм}^3$, т.е. в 3,6 раза меньше, чем в водопроводной воде. Это объясняется образованием в пробе №1 растворимых комплексов ОПР с CaCO_3 , устойчивость которых повышается вследствие низкой СУ ассоциатов воды и более высокого ПЗ по вертикали (см. табл. 7).

Для исследования влияния лазерного и УФ-облучения на структурные свойства воды в пробе №1 был разработан специальный метод.

Сущность метода: при кипячении пробы воды и уменьшении ее объема на 50 % (с последующим восстановлением объема дистиллированной водой) формирование твердой фазы CaCO_3 контролируют определением значений ΔT_{254} и $\Delta \chi$. При этом исходили из предположения, что кальций, дополнительно вводимый в раствор, будет удерживаться в количестве меньшем исходного, поскольку равновесие в системе



будет смещаться в сторону формирования осадка.

Из результатов эксперимента (рис. 16) видно, что вода в пробах №2 и №3, обработанная лазером или лазером с УФ (см. табл. 8), способна удерживать в растворе катионы кальция в концентрации $0,05\text{--}0,25 \text{ мг-экв/дм}^3$, т.е. почти в 2 раза больше, чем в пробе №1.

Установлено, что проба 3 характеризуется проявлением аномальных свойств, так как после обработки ее лазером и УФ наблюдалось большее СУ и ПЗ по горизонтали, вертикали и в ассоциатах по сравнению с исходной водой и водой, обработанной только лазером.

Результаты исследований устойчивости комплексов ОПР с соединениями железа в водных растворах по разработанной методике, представленной в главе 3, также приведены в табл.8. Из них следует, что максимальное значение $K_{\text{коп}}$ имеет проба № 1. Несмотря на меньшее в 3,6 раза содержание ООУ в

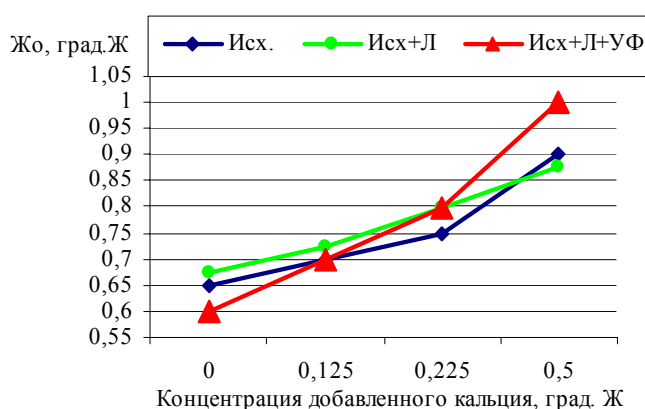


Рис. 16. Влияние лазерного и УФ-облучения на жесткость растворов карбоната кальция, приготовленных на воде скважины № 1

этой воде, чем в пробе № 6, прочность комплексных соединений ОПР с железом значительно выше. Это можно объяснить низкой СУ ассоциатов воды в пробе № 1. Поэтому она в меньшей степени сольватирует комплекс железа с ОПР.

Сольватирующая способность воды, обработанной лазером и УФ-облучением (проба №3), по отношению к комплексу Fe (III) – ООУ, несколько ниже и сравнима с сольватирующей способностью воды в пробе № 1. Это обусловлено высокой степенью ПЗ в составе ассоциатов воды, приводящей к ПЗ к комплексу Fe (III) – ООУ и увеличению его устойчивости. Резко отличается по анализируемому показателю проба № 4, обработанная лазером: значение $K_{\text{коп}} = (-4,8)$.

В воде, обработанной лазером, из-за низкой величины ПЗ в составе ее ассоциатов образуются более слабые комплексы с Fe (III), чем в воде пробы № 3.

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод, что обработка водного раствора ультрафиолетовым или лазерным воздействием влияет как на свойства примесей (органических, неорганических), так и на структурные свойства растворителя (воды). Разработанные лабораторные методики суммарной оценки свойств водных растворов по отношению к соединениям кальция и железа могут быть использованы для выбора метода воздействия, оптимизации схемы подготовки воды и контроля ее свойств.

В **шестой главе** рассмотрены результаты контроля содержания и свойств ОПР в воде, поступающей в озеро Исеть из систем охлаждения Среднеуральской ГРЭС.

Предприятия энергетики, сбрасывая воду после охлаждения конденсаторов в поверхностный водоем, увеличивают температуру воды на 4-5 °С. Это приводит в летний период времени к форсированному развитию сине-зеленых водорослей в водоеме («тепловое загрязнение»), повышению рН, загрязнению конденсаторов и снижению эффективности их работы. Для экологической защиты водоема на Среднеуральской ГРЭС разработан биологический способ, который реализуется с помощью специального сооружения – биомодуля, установленного на сбросном канале ГРЭС. Биомодуль формирует три зоны очистки воды: первая – механическая, вторая – с использованием растений, третья – с использованием специальных видов рыб. Доказано, что биомодуль снижает содержание биомассы фитопланктона и способствует снижению нитратов и рН воды в водоеме.

Однако в исходной воде, поступающей на ВПУ ТЭС, показатель «окисляемость» не изменяется, тогда как показатель «цветность», характеризующий наличие железо-органических соединений, увеличивается ежегодно. Кроме этого, замечено, что в летний период увеличивается содержание продуктов деструкции ионитов в очищенной на ВПУ воде (глава 3). В связи с этим возникла необходимость оценки целесообразности установки биомодуля и разработки критериев эффективности его работы.

В процессе исследований, проведенных в летний период 2006 года, установлено, что при содержании ООУ до биомодуля 14,1-14,9 мг/дм³ значение

окисляемости изменяется от 15,4 до 23,4 мгО/дм³, то есть даже при небольшом снижении содержания ОПР в воде существенно изменяется способность их к окислению перманганатом калия. В летний период 2008 года выявлено, что при снижении окисляемости содержание ООУ в водоисточнике увеличивается. Не удалось установить взаимосвязь между способностью соединений к окислению и их способностью к «отравлению» анионитов, поскольку, при существующей системе контроля, не обеспечивается эффективное удаление ОПР на стадии предварительной очистки, поэтому на анионите адсорбируются анионы сильных кислот, ОПР и комплексные соединения ОПР с алюминием и железом.

В настоящее время для решения этой проблемы разрабатывается комплексный подход к организации системы технологического контроля и управления на ВПУ ГРЭС, учитывающий изменение содержания и свойств ОПР в летний период времени. В целях корректировки мероприятий по экологической защите водоема в летний период и разработке профилактических мер по защите ионитов от негативного воздействия ОПР текущий мониторинг водоисточника расширен по количеству точек контроля и включает следующие дополнительные показатели: ООУ, коэффициент $K_{\text{коп}}$ и цветность.

В **седьмой главе** приведено эколого-экономическое обоснование результатов совершенствования методологии аналитического и технологического контроля состава и свойств воды, содержащей ОПР.

ОПР, содержащиеся в производственных водах ТЭС, способствуют загрязнению конденсатора и коррозии оборудования системы охлаждения; увеличению запаха и цветности воды, увеличению в воде содержания растворенного железа, загрязнению теплообменного оборудования теплофикационного контура; повышению коррозионных свойств воды и пара, а также снижению надежности и эффективности работы оборудования основного контура; снижению эффективности предочистки, загрязнению оборудования на ВПУ, «отравлению» анионитов и увеличению расхода воды на собственные нужды на стадии водоподготовки (негативное влияние).

Доказано, что для снижения негативного влияния ОПР на производственные процессы необходимо контролировать их содержание и свойства в технологическом цикле.

В схемах обессоливания следует определять содержание ООУ (РОУ) на разных стадиях водоподготовки с помощью приборов автоматического контроля. При этом организация технологического контроля с использованием патентов № 2289120 «Способ определения органической загрязненности воды», № 2207560 «Способ загрязненности ионообменных смол» позволяет стабилизировать содержание ОПР в воде и разработать мероприятия по оптимизации работы анионита в схеме обессоливания наряду с сокращением расхода воды на его отмывку. Ожидаемый экономический эффект – около 1 млн. руб. в год (в зависимости от стоимости используемых анионитов).

Ожидаемый экономический эффект от использования патента № 2293968 «Способ контроля загрязненности фильтров для очистки воды» и

организация схемы утилизации промывочных вод составит около 755 тыс. руб. в год за счет сокращения расхода воды на собственные нужды ВПУ.

Контроль за эффективностью удаления ОПР в воде можно осуществлять спектрофотометрическим методом по величине светопропускания в видимой области спектра.

Система контроля качества воды по величине светопропускания, реализованная на Чайковской ТЭЦ, позволяет оперативно контролировать и корректировать режим водоподготовки, обеспечивая стабильное качество воды по органолептическим и эпидемиологическим показателям.

Использование принципиально нового подхода к контролю содержания ОПР в воде и корректировке реагентного режима в процессе ее подготовки позволяет стабилизировать добавочную воду по сухому остатку и снизить количество продувочной воды котлов среднего давления на 0,8-1,0 %. Экономический эффект ожидается за счет снижения расхода газа на 14,5 тыс. м³ в месяц (для одного котла), а экологический эффект – за счет сокращения эмиссии углекислого газа на 28,5 тыс. т в месяц (для одного котла).

Реагенты-ингибиторы снижают накипеобразование и коррозионную активность производственных вод ТЭС. Внедрению технологии подготовки воды с использованием ингибитора ИОМС-1 на 10 предприятиях ОАО «Свердловэнерго» предшествовал комплекс научно-исследовательских работ, который включал разработку методик контроля ингибитора в товарном продукте (входной контроль), рабочих растворах и производственных водах.

Внедрение технологии позволило упростить схемы водоподготовки и снизить удельную загрязненность поверхностей нагрева. Ежегодный экономический эффект (с 1994 г.) складывается из снижения расхода 1000 т серной кислоты, 3000 т поваренной соли и 100 т катионита. За десять лет использования технологии суммарный экономический эффект (в ценах 2008 г.) составил 90,5 млн. руб. За счет снижения объема сброса в водоемы солевого стока на 900 тыс. м³ в год достигнут экологический эффект.

Обоснование ингибирующего эффекта природных ОПР позволило сократить суммарный расход ингибитора (с 2000 г.) на 30 %, что обеспечило экономию денежных средств за 4 года (в ценах 2008 г.) 2,9 млн. руб. Вследствие применения УЗ-аппаратов в ТФК СУГРЭС снижена загрязненность ПГВ и увеличен межпромывочный период, что позволило оптимизировать режим деаэрации и сократить расход щелочи. Экономический эффект от внедрения этого мероприятия составил 803,8 тыс. руб. в год.

Экономический эффект от организации контроля содержания железа в промывочных водах в период растопки достигается за счет сокращения времени растопки на 1,5-2 часа, потерь обессоленной воды на 300-400 тонн, расхода газа на 4,56 у.т. и предотвращения загрязнения турбины.

В заключении сформулированы следующие основные выводы по работе:

1. Определение общего содержания органических примесей (ОПР) в поверхностных, артезианских, производственных и питьевых водах необходимо осуществлять по показателю общий (ООУ) или растворенный (РОУ)

органический углерод. Методика определения ООУ (РОУ) с использованием ИК-спектрометрии аттестована и внесена в Федеральный реестр (ФР 1.31.2005.01703). На основании результатов исследований и международного стандарта ИСО 8245 разработан Национальный стандарт «Вода. Методы определения массовой концентрации общего (ООУ) и растворенного (РОУ) органического углерода» в целях обеспечения единства измерений показателей в водах различного типа.

2. Необходимым условием предотвращения негативного влияния ОПР на состояние основного и вспомогательного оборудования ТЭС является обеспечение стабильности состава и свойств добавочной воды путем внедрения разработанных технологических принципов и методик контроля, а также автоматизации контроля и корректировки технологических режимов водоподготовки ТЭС.

3. Совершенствование технологического контроля за процессом предварительной очистки воды путем установки автоматических приборов для измерения величины светопропускания в видимой области спектра (длина волны 430-530 нм) позволит своевременно корректировать процесс очистки воды для обеспечения стабильного содержания взвешенных веществ, соединений железа, алюминия и ОПР. Оптимальное значение этого показателя определяется на основании лабораторного эксперимента.

4. Применение экспресс-методик, разработанных для контроля работы механических фильтров, позволяет:

- оценивать содержание взвешенных веществ в очищенной воде, гряземкость фильтра и оптимизировать режим промывки фильтров, снизив расход воды на собственные нужды (Пат. 22245578 от 15.07.02);

- контролировать в схемах обессоливания процесс ионного обмена по величине светопропускания, измеряемой при длине волны 254 нм (УФ-область) с пересчетом на значение РОУ (Методика определения РОУ аттестована и внесена в Федеральный реестр (ФР 1.31.2005.01704));

- определять сорбционную емкость ионита в схемах обессоливания: по органическим веществам на основе измерений значения светопропускания до и после анионитовых фильтров (Пат. 2293968 от 20.02.07);

- оценивать чистоту товарного ионита и его загрязненность ОПР в процессе эксплуатации по величине диэлектрической проницаемости смолы (Пат. 2207560 от 08.11.03), что позволяет своевременно скорректировать мероприятия по восстановлению материала;

- контролировать процесс ионного обмена в схемах умягчения воды по величине светопропускания, измеряемой при длине волны 430 нм. Критерий оптимального процесса ионного обмена: $\Delta T = 0$.

5. Разработан способ оценки негативного воздействия ОПР на железо по величине коэффициента $K_{\text{коп}}$. Установлено, что устойчивость комплексов железа (III) в водных растворах зависит от природы лиганда и понижается в следующем порядке: трилон Б, фталевая кислота, салициловая кислота, продукты деструкции ионообменных смол АВ-17, КУ-2-8. Устойчивость комплексных соединений Fe (III) с природными ОПР сопоставима с устойчиво-

стью комплексов железа (III) с трилоном Б. Способ оценки комплексообразующих свойств запатентован (Пат. 2267783 от 10.01.06). Аттестована и внесена в Федеральный реестр методика определения активности органических примесей в водных растворах по значению коэффициента $K_{\text{коп}}$ (ФР 1.31.2005.01705).

6. Установлена необходимость и возможность обеспечения стабильного качества конденсата после БОУ по ОНР путем контроля величины светопропускания в УФ-области спектра и своевременной корректировки режима работы БОУ. Доказана целесообразность применения для качественной оценки «вторичной загрязненности» конденсата после БОУ относительного увеличения электропроводимости конденсата после всех фильтров ФСД, установленных на БОУ.

7. Результат воздействия ОНР на внутреннюю поверхность оборудования – это образование рыхлых отложений на наиболее теплонапряженных участках. Характер отложений зависит от содержания и свойств ОНР, поступающих в тракт блока при стационарном режиме работы, а также от эффективности консервации оборудования в период останова. Обеспечить эффективную очистку котла от продуктов коррозии оборудования можно путем использования в процессе растопки экспресс-контроля промывочной воды на содержание железа. Методика разработана на основании установленной линейной зависимости между оптической плотностью в УФ-области спектра и содержанием взвешенных веществ, обусловленным соединениями железа в промывочных водах. Использование методики позволяет сократить время растопки примерно на 1,5-2 часа за счет сокращения времени на выполнение анализа железа традиционным методом и предотвратить загрязнение турбины.

8. Разработана методика определения содержания ингибитора ИОМС-1 в товарном продукте, рабочих растворах, производственных водах и предложен метод оценки химической активности водных растворов при введении в них органических реагентов для оптимизации реагентного режима в теплосети. Внедрение технологии подготовки воды с разработанной системой контроля содержания и свойств ингибитора на 10 предприятиях ОАО «Свердловэнерго» позволило упростить схемы водоподготовки, снизить удельную загрязненность поверхностей нагрева, получить экономический эффект (около 95 млн. руб.) и экологический эффект за счет снижения объема сброса в водоемы солевого стока на 900 тыс. м³ в год.

9. Установлена зависимость свойств водных растворов от воздействия ультрафиолетового и лазерного излучения. Для оценки свойств водных растворов (с учетом структурных свойств воды) предложен метод лабораторного контроля, который может быть использован для оптимизации схем подготовки воды в ТФК ТЭС.

10. Доказана целесообразность применения биомодуля в сбросном канале Среднеуральской ГРЭС, показана необходимость использования для контроля работы биомодуля дополнительных показателей: ООУ и $K_{\text{коп}}$. Это позволит более адекватно оценивать экологическое состояние водоема и кор-

ректировать не только мероприятия его экологической защиты, но и меры по защите ионитов от негативного воздействия ОНР.

Список патентов и опубликованных работ по теме диссертации

1. Способ получения ингибитора минеральных солей: пат. 2168514 Рос. Федерация / Колмогорова И.В., Белоконова Н.А., Корюкова Л.В., Белоконова А.Ф. – №2000114153; заявл. 06.06.00; опубл. 10.06.01, Бюл. № 16.

2. Способ контроля загрязненности ионообменных смол: пат. 2207560 Рос. Федерация / Белоконова Н.А., Меньшиков А.И. – №2001130311; заявл. 08.11.01; опубл. 27.06.03, Бюл. № 18.

3. Способ определения загрязненности механического фильтра: пат. 22245578 Рос. Федерация / Белоконова Н.А. – №2002119049 ; заявл. 15.07.02; опубл. 27.02.04, Бюл. № 6.

4. Устройство для определения загрязненности воды: свидетельство на ПМ. 11895 Рос. Федерация / Гаврилов Л.Ф., Сергеев А.И., Белоконова Н.А., Корюкова Л.В. – №99110142; заявл. 17.05.99; опубл. 16.11.99, Бюл. № 11.

5. Способ определения общей органической загрязненности воды: пат. 2289120 Рос. Федерация / Белоконова Н.А., Корюкова Л.В. – №2003135649; заявл. 08.12.03; опубл. 10.12.06 , Бюл. № 34.

6. Способ определения химической активности органических соединений по отношению к соединениям железа в водных растворах: пат. 2267783 Рос. Федерация / Белоконова Н.А., Корюкова Л.В. – №2004113724; заявл. 05.05.04; опубл. 10.01.06, Бюл. № 1.

7. Способ определения загрязненности фильтра для очистки воды: пат. 2293968 Рос. Федерация / Белоконова Н.А., Корюкова Л.В. – №2005103872/28 ; заявл. 14.02.05; опубл. 20.02.07, Бюл. № 5.

8. Белоконова Н.А. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на процесс предочистки / Н.А. Белоконова, Л.В. Корюкова, Т.А. Королева // Электрические станции. 1997. №5. С. 40-43.

9. Белоконова Н.А. Оценка эффективности работы деаэраторов в схеме подготовки воды для горячего водоснабжения / Н.А. Белоконова, Л.В. Корюкова, О.А. Антропова // Электрические станции. 1998. №10. С. 27-29.

10. Пути совершенствования водно-химического режима энергоблоков СКД в системе «Свердловэнерго» / Л.В. Корюкова, А.Ф. Белоконова, Н.А. Белоконова, А.И. Ковалев // Теплоэнергетик. 1999. № 7. С. 30-34.

11. Белоконова Н.А. Применение оксихлорида алюминия в качестве коагулянта при подготовке воды к использованию в энергетике / Н.А. Белоконова // Энергетика региона. 1999. № 8. С. 84.

12. Использование неорганического флокулянта СФ-А1 в технологии подготовки питьевой воды / Н.А. Белоконова, Л.В. Корюкова, Н.А. Обожин, В.В. Устюжанинов // ВСТ. 2000. №9.

13. Опыт реконструкции водоподготовительных установок в ОАО «Свердловэнерго» / Л.В. Корюкова, Н.Н. Добров, О.В. Нохова, Н.А. Белоконова // Электрические станции. 2003. №5. С. 57-59.

14. Освоение новых методов контроля – путь к внедрению прогрессивных технологий и режимов / Л.В. Корюкова, А.Л. Малюков, А.А. Шохирев, Н.А. Белоконова // Электрические станции. 2003. №5. С. 54-56.
15. Белоконова Н.А. О необходимости контроля качества питьевых вод по содержанию общего органического углерода / Н.А. Белоконова // Экологическая химия. 2003. Вып.3. С. 197-199.
16. Белоконова Н.А. Проблемы, возникающие при оценке качества питьевой воды по ее цветности / Н.А. Белоконова // Экологическая химия. 2003. Вып.4. С. 269-272.
17. Белоконова Н.А. Опыт эксплуатации АН-31 и проблема «отравляемости» ионитов / Н.А. Белоконова, Л.А. Петрова, О.Л. Гентух // Энергетик. 2003. №7. С. 42-43.
18. Белоконова Н.А. Опыт применения ИОМС-1 для подготовки подпиточной и сетевой воды / Н.А. Белоконова, Л.В. Корюкова // Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования: сб.ст. М.: Новый век, 2003. С. 77-78.
19. Белоконова Н.А. Современные проблемы выбора критериев контроля качества питьевой воды / Н.А. Белоконова // Питьевая вода. 2004. № 4. С. 15-21.
20. Белоконова Н.А. Общие экологические проблемы энергетики и общества / Н.А. Белоконова, Л.В. Корюкова, Л.С. Соловьев // Пути совершенствования экологического мониторинга. Современные проблемы профилактической медицины, среды обитания и здоровья населения промышленных регионов России / под общ. ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. Екатеринбург: Авторы, 2004. С. 198-202.
21. Белоконова Н.А. Оценка химической активности ингибитора накипеобразования ИОМС-1 / Н.А. Белоконова // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. №5. С. 28-29.
22. Белоконова Н.А. Принципиальный подход к организации работ по совершенствованию системы контроля и управления в энергетическом производстве / Н.А. Белоконова, Л.В. Корюкова, Л.С. Соловьев // Энергоанализ и энергоэффективность. 2005. №2. С. 43-45.
23. Белоконова Н.А. Определение содержания примесей взвешенного железа в производственных водах с использованием анализатора АЖТ-94/4С-УФ / Н.А. Белоконова, Р.Д. Мухамедьяров // Приборы. 2006. №10. С. 46-48.
24. Белоконова Н.А. Проблемы контроля качества пара в тракте блоков СКД / Н.А. Белоконова // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. №5. С. 28-29.
25. Корюкова Л.В. Приборы для технологического и экологического контроля качества воды по содержанию органических веществ / Л.В. Корюкова, Н.А. Белоконова, Л.С. Соловьев // Экология производства. 2006. №2 (3).
26. Белоконова Н.А. Контроль качества турбинного конденсата после БОУ/ Н.А. Белоконова, Л.В. Корюкова // «Автоматизация химического контроля и управления установками водоприготовления и водно-химическими режимами ТЭС»: сб.ст. М.: РАО ЕЭС, 2006. С. 146-153.

27. Белоконова Н.А. Контроль качества обессоленной воды на анализаторе АЖТ-94/4С-УФ / Н.А. Белоконова, Р.Д. Мухамедьяров, Х.Н. Мухамедзянов // Приборы. 2006. № 12. С. 60-61.

28. Использование клеточной культуры в качестве модели определения токсичности воды / А.А. Бахарев, Н.А. Белоконова, П.В. Устьянцев, Н.А. Шмелева // Гигиеническая безопасность и здоровье населения в промышленных регионах / под общ. ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. Екатеринбург: Авторы, 2006. С. 9-10.

29. Белоконова Н.А. Улучшение качества воды водохранилищ-охладителей биологическим способом / Н.А. Белоконова, Э.Л. Зубарева // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. №1-2. С. 65-69.

30. Белоконова Н.А. Перспективы использования спектрофотометрического метода для контроля содержания органических примесей в обессоленной воде и турбинном конденсате / Н.А. Белоконова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. №3-4. С. 142-146.

31. Зубарева Э.Л. Качество поверхностных вод: проблемы и решения / Э.Л. Зубарева, Н.А. Белоконова // Экология и промышленность России. 2007. № 6. С. 28-29.

32. Белоконова Н.А. Проблемы и методы контроля содержания органических примесей в производственных водах ТЭС / Н.А. Белоконова // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. №2. С. 21-22.

33. Белоконова Н.А. Влияние органических примесей на процессы очистки воды в теплоэнергетике / Н.А. Белоконова. Екатеринбург: Ажур, 2008. 101 с.

34. Белоконова Н.А. Определение содержания железа в период растопки блоков СКД / Н.А. Белоконова // Электрические станции. 2008. №10. С. 38-41.

Сокращения: БОУ – блочная обессоливающая установка, ВПУ – водоподготовительная установка, ВЗ – встроенная задвижка, ИОМС – ингибитор отложений минеральных солей, ИРЕА – научно-исследовательский институт реактивов и особо чистых химических веществ (г. Москва), $K_{\text{коп}}$ – коэффициент, оценивающий устойчивость комплексов ОНР, ЛОС – летучие органические соединения, ООУ – общий органический углерод, ОНР – органические примеси, ПВ – питательная вода, ПЗ – перенос заряда, ПП – полоса поглощения, РОУ – растворенный органический углерод, СКД – сверх критического давления, СУ – структурная упорядоченность, Т – величина светопропускания, ΔT – изменение величины светопропускания, ТФК – теплофикационный комплекс, УФ – ультрафиолет, УНИИМ – Уральский научно-исследовательский институт метрологии, ФСД – фильтры смешанного действия.

Подписано в печать

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 2,96

Плоская печать

Тираж 120 экз.

Формат 60x84 1/16

Усл. печ.л. 2,44

Заказ

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19