

На правах рукописи

СЛЕСАРЕНКО
Вячеслав Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ
ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕМБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
(на примере Дальневосточного региона)**

Специальность 05.14.14 — "Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ВЛАДИВОСТОК — 2006

Работа выполнена на кафедре теоретической и общей теплотехники в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Дальневосточный государственный технический университет" (ДВПИ им. В. В. Куйбышева), г. Владивосток.

Официальные оппоненты:

— доктор техн. наук, профессор	<i>Боровков Валерий Михайлович</i>
— доктор техн. наук, ст. науч. сотр.	<i>Василенко Геннадий Васильевич</i>
— доктор техн. наук, профессор	<i>Малахов Игорь Александрович</i>

Ведущая организация — *Государственное учреждение – Институт химии Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток.*

Защита диссертации состоится 6 июня 2006 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "25" апреля 2006 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)5521630

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



К. А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Постоянная потребность тепловых электростанций (ТЭС) и котельных в поддержании водного баланса обусловлена наличием технологических потерь воды и пара, невозможностью полной регенерации всех видов теплоносителя, в том числе промышленных стоков, и наличием безвозвратных потребителей пара и горячей воды. Для теплоэнергетических установок (ТЭУ) характерно непрерывное потребление значительного количества воды высокого качества.

Для удовлетворения технологических требований, предъявляемых к качеству воды, используемой ТЭУ, необходима специальная физико-химическая обработка природной воды. Одновременно с обработкой воды с целью последующего превращения ее в теплоноситель для ТЭС и котельных, необходимо комплексно решать вопросы, связанные с утилизацией образующихся в процессах водоподготовки сточных вод.

Снижение качества теплоносителя приводит к ухудшению эксплуатационных, экологических и экономических показателей энергетических установок, перерасходу топлива и выходу из строя оборудования. Таким образом, качество обработки воды на ТЭС и котельных тесно связано с надежностью и экономичностью эксплуатации теплоэнергетического оборудования.

Применяемые на ТЭУ традиционные технологии водоподготовки обеспечивают в большинстве случаев необходимую очистку природных вод и доведение их качества до эксплуатационных нормативов. Однако для этих технологий характерны значительные затраты дорогостоящих реагентов и расходных материалов, большое количество экологически опасных стоков и низкий уровень автоматизации процессов обработки воды.

Анализ современных подходов к решению проблемы повышения качества теплоносителя на ТЭУ показывает, что применение на водоподготовительных установках (ВПУ) новых технологических схем обработки воды с совместным (комбинированным) использованием обратноосмотических, электродиализных, специализированных термических и гидромагнитных технологий в сочетании с традиционными методами очистки является одним из наиболее перспективных направлений развития водоподготовки в теплоэнергетике.

В области развития безреагентных технологий водоподготовки наиболее известными являются работы российских ученых Голубцова В.А., Гребенюка В.Д., Дытнерского Ю.И., Заболоцкого В.И., Карелина Н.Ф., Классена В.И., Кострикина Ю.М., Кремневской Е.А., Лапотышкиной Н.П., Мартыновой О.В., Мошкарина А.В., Паули Е.В., Седлова А.С., Смагина В.Н., Стермана Л.С., Субботиной Н.П., Тебенихина Е.Ф. и др.

Разработка различных современных систем ВПУ для ТЭУ продолжается в ведущих научных организациях по проектированию и созданию теплотехнического оборудования (ВТИ, ЦКТИ, ВНИПИЭнергопром, ВНИИВОДГЕО, ВНИИАМ, Теплоэнергопроект, Атомэнергопроект и др.) и

крупнейших университетах, имеющих специализированные кафедры (МЭИ, Ивановском ГЭУ, С-Пб ГТУ, Уральском ГТУ, Дальневосточном ГТУ, Казанском ГТУ и др). До настоящего времени не нашли пока широкого применения в теплоэнергетике процессы непрерывной очистки теплоносителя в установках электродиализа и обратного осмоса. От задач практики отстают исследования в области разработки для ТЭС низкотемпературных термических обессоливающих аппаратов и применения испарителей в комбинации с мембранными установками и гидромагнитными системами.

Особое значение имеет развитие безреагентных технологий водоподготовки для ТЭУ Дальневосточного региона РФ. Это связано: во первых, со спецификой источников водоснабжения, качество воды в которых существенно отличается от показателей, характерных для других регионов страны; во вторых, ТЭС и системы теплоснабжения Дальнего Востока отдалены от основных поставщиков оборудования, реагентов, комплектующих материалов, что приводит к существенному повышению эксплуатационных расходов на ВПУ; в третьих, дефицит специалистов высокой квалификации (на фоне отсутствия в регионе ресурсов рабочей силы) обуславливает необходимость применения автономных агрегатированных технологий водоподготовки, имеющих высокий уровень автоматизации. В настоящее время устранение указанных недостатков возможно только за счет внедрения на ТЭУ комбинированных систем водоподготовки, содержащих в схемах ВПУ безреагентные технологии обработки воды.

Настоящее исследование направлено на решение важной народно-хозяйственной проблемы по совершенствованию процессов использования водных ресурсов при эксплуатации ТЭУ и повышению экологической безопасности техногенных систем в энергетике. Оно выполнено в соответствии с плановой тематикой научно-исследовательских работ ДВГТУ (№№ гос. рег. тем: ГБ 53.1.2.99 - 04), Федеральной целевой программой «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997-2007 гг.», отраслевых программ РАО ЕЭС России «Программа реструктуризации энергетики РФ в 2001-2005 гг.» и «Программа энергосбережения в отрасли «Электроэнергетика» в 1999-2000 гг. и на перспективу до 2005 и 2010 гг.», а также по заявкам региональных ОАО «Энерго» и муниципальных органов управления на основе заключения договоров на проектные, наладочные и научно-исследовательские работы.

Цель работы – повышение надежности, экономической и технологической эффективности и экологической безопасности теплоэнергетических установок.

Для этого в работе были поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

- установлены классификационные характеристики и эффективность использования технологий водоподготовки на ТЭУ Дальневосточного региона с учетом специфики местных источников водоснабжения и показателей качества воды;

- разработана концепция модернизации ВПУ на ТЭУ Дальневосточного региона на базе мембранных технологий водоподготовки в сочетании с ионообменными, термическими, гидромагнитными и другими методами обработки воды;

- предложены и обоснованы математические модели процессов безреагентной водоподготовки, на основе которых получены расчетные зависимости и характеристики для оценки технологических возможностей и эффективности мембранных технологий в условиях промышленного внедрения;

- экспериментальными исследованиями подтверждена возможность применения на ТЭУ комбинированных ВПУ, оснащенных электродиализными аппаратами;

- установлен регламент и доказана эффективность применения установок обратного осмоса на теплоэнергетических объектах Дальневосточного региона;

- предложены к внедрению и рассчитаны схемы аппаратов для термического обессоливания воды низкотемпературного потенциала в комбинированных системах водоподготовки;

- исследованы и внедрены в схемах комбинированных ВПУ гидромагнитные аппараты для воздействия на теплоноситель с целью интенсификации мембранных и традиционных технологий водоподготовки;

- разработана и апробирована методика техноэкономической оптимизации исследуемых комбинированных систем водоподготовки.

При разработке перспективных технологий водоподготовки реализованы следующие технические решения:

- определены энерготехнологические характеристики процессов и аппаратов электродиализного и обратноосмотического обессоливания, рекомендованных для комбинированных систем водоподготовки на ТЭУ Дальневосточного региона;

- реализованы с экспериментальной проверкой и при опытно-промышленной эксплуатации оптимальные схемные и конструктивные решения исследуемых ВПУ;

- подготовлены технические проекты комбинированных ВПУ для ряда ТЭС и промышленно-отопительных котельных, оснащаемых мембранными обессоливающими установками и гидромагнитными аппаратами;

- использованы технические решения для повышения показателей испарительных установок, применяемых для получения добавочной воды на ТЭС Дальневосточного региона;

- внедрены водоподготовительные комплексы на базе гидромагнитных аппаратов объемного типа для интенсификации процессов обработки теплоносителя и поддержания водно-химического режима теплоэнергетического оборудования.

Научная новизна работы.

1. Предложены новые методы повышения эффективности, надежности, экономичности и экологической безопасности систем водоподготовки на ТЭУ за счет комбинирования мембранных технологий с традиционными

ионообменными и термическими методами обессоливания, а также применения на ВПУ современных гидромагнитных аппаратов.

2. Разработаны технологические схемы комбинированных ВПУ, обеспечивающие нормативные режимы работы аппаратов электродиализного, обратноосмотического и термического обессоливания на водах Дальневосточного региона.

3. Для моделирования электродиализного и обратноосмотического процессов предложена система критериев, оценивающих многофакторность изменения технологических характеристик комбинированных ВПУ.

4. Обоснована и апробирована методика расчетов технологических схем испарительных установок при включении аппаратов термического обессоливания в состав комбинированных ВПУ на ТЭС Дальнего Востока.

5. Установлены и использованы для расчетов, при проектировании и внедрении гидромагнитных систем основные закономерности эксплуатации гидромагнитных аппаратов в схемах комбинированных ВПУ на ТЭУ.

6. Определены технико-экономические и энерго-технологические показатели комбинированных системах водоподготовки, позволившие обосновать различные методы их совершенствования.

Достоверность результатов исследований обеспечена использованием современных математических методов моделирования, сопоставлением расчетных характеристик с экспериментальными и эксплуатационными данными, полученными на опытно-промышленных установках и в производственных условиях, сравнением показателей ВПУ с допустимыми нормами качества воды и параметрами вводно-химического режима энергетического оборудования.

Практическая значимость работы.

1. Подготовлены современные проектные и конструкторские решения, обеспечивающие внедрение новых и совершенствование действующих водоподготовительных систем на энергетических предприятиях Дальневосточного региона.

2. Обосновано промышленное применение мембранных методов очистки воды на ТЭУ для снижения расходов дорогостоящих и экологически опасных реагентов, используемых в системах водоподготовки.

3. Найдены технические решения, примененные при проектировании и внедрении аппаратов для безреагентной обработки воды, способствующие утилизации и переработке стоков ВПУ энергетических предприятий в нестандартных условиях Дальневосточного региона.

4. Усовершенствованная гидромагнитная технология обработки воды использована на практике в комплексе с традиционными системами водоподготовки, установками для очистки поверхностей нагрева от отложений и аппаратами для коррекционной обработки теплоносителя.

5. За счет разработки и внедрения апробированных комбинированных систем водоподготовки достигнуто значительное повышение технико-экономических и экологических показателей ТЭС и котельных без существенной модернизации оборудования.

Реализация работы. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили рекомендовать к внедрению на тепловых электростанциях и промышленно-отопительных котельных Дальневосточного региона ряд современных технологий и аппаратов, способствующих решению важных производственных задач: при разработке и экспериментальном опробовании системы очистки конденсата на Артемовской ТЭЦ ОАО «Дальэнерго»; в проектно-конструкторских разработках, создании и наладке узлов электродиализной установки ЭДУ-20 на Артемовской ТЭЦ ОАО «Дальэнерго»; при энергоаудите и наладке ВПУ с испарителями на Сахалинской ГРЭС ОАО «Сахалинэнерго»; при исследовании и наладке ВПУ завода «Дальэнергомаш» г. Хабаровск; при проектировании установки очистки стоков станции обезжелезивания ЗАО «ЛуТЭК», пос. Лучегорск; при проектировании, монтаже и наладке ВПУ муниципальной котельной и разработке систем водоподготовки для тепловых пунктов МУП ЖКХ г. Фокино; при проектировании, изготовлении, монтаже и наладке систем коррекционной обработки воды с гидромагнитными аппаратами в тепловых сетях для МУП ЖКХ в г. Большой Камень; при разработке технических предложений для внедрения мембранных обессоливающих установок на электростанциях ОАО «Дальэнерго» (Владивостокская ТЭЦ-2), ЗАО «ЛуТЭК» (Приморская ГРЭС), ОАО «Сахалинэнерго» (Сахалинская ГРЭС), ОАО «Камчатскэнерго» (Камчатская ТЭЦ); при проектировании и внедрении гидромагнитных систем на значительном количестве котельных и в системах теплоснабжения промышленных предприятий региона; при разработке учебников и учебных пособий по курсам «Водоподготовка», «Тепломеханическое и вспомогательное оборудование ТЭС», в курсовых и дипломных проектах студентов специальностей «Тепловые электрические станции» и «Промышленная теплоэнергетика».

Результаты использования разработок на производстве подтверждены актами выполненных работ с расчетным сроком окупаемости не более одного года. Общая сумма годового экономического эффекта составляет около трех миллионов рублей.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, региональных конференциях, совещаниях и научных семинарах, в числе которых The Second Annual Meeting of the European Desalination Society on Desalination and Environment, Genoa, Italy. October 20 -23, 1996; IDA world congress on desalination and water resource. Spain. October 6-9, 1997; European Conference on Desalination and Environment. Las Palmas, Grand Canaria. November 9 – 12, 1999; European Conference on Desalination and Environment: Water Shortage. Lemesos, Cyprus. May 28-31, 2001; EuroMed 2002 Conference on Desalination Strategits in South Mediterranean Countries. Sharm El Sheikh, Egypt. May 4 – 6, 2002; International Conference on Nuclear Desalination - Challenges and Options. Marrakesh, Morocco. October 16 -18. 2002; The 2nd International Conference on Application of Membrane Technology. Beijing, 2002; European Conference on Desalination and Environment: Fresh Water for All. Malta. May 4 -8,

2003; European Conference on Desalination and Environment. Santa Margherita, Italy. May 22 -25, 2005; The Second International Exergy, Energy and Environment Symposium. (IEEES2) Kos, Greece. July 3 – 7, 2005; региональная конференции «Комплексные проблемы использования океанических вод», Владивосток, 1976; региональная научно-практическая конференция «Совершенствование технологии и автоматизации предприятий и производства», Владивосток, ДВТИ, 1992; международная конференция «Приморские зори», Владивосток, Тихоокеанская академия экологии и безопасности жизнедеятельности (1998, 1999, 2001, 2005 г.г.); зональное совещание «О состоянии и мерах по улучшению водно-химического режима на электростанциях и в тепловых сетях», г. Южно-Сахалинск. 1999; первый международный инвестиционный конгресс «Новейшие технологии в системе интеграционных процессов территорий стран АТР», Владивосток, 2000; региональная научная конференция «Вологдинские чтения», Владивосток, ДВГТУ (1998, 2001, 2003, 2004 г.г.); Приморская краевая конференции энергетиков, Владивосток, (2002, 2003, 2004 г.г.); IV региональный семинар по теплофизике и теплоэнергетике, Владивосток, 2005 г.; Тихоокеанский энергетический форум; 2005 г., Владивосток.

Материалы работы обсуждались на научных семинарах профильных энергетических кафедр МЭИ, СПбГТУ, ДВГТУ и научных семинарах института химии ДВО РАН. Прикладные аспекты работы докладывались на отраслевых и межотраслевых совещаниях, технических советах при главных инженерах региональных ОАО «Энерго», информация о выполненных исследованиях размещена в сети ИНТЕРНЕТ www.FESTU.ru.

Вклад автора в работу заключается в постановке и решении научных задач, проведении экспериментов и выполнении расчетов, анализе полученных экспериментальных данных и результатов математического моделирования, авторском надзоре за процессом реализации выполненных разработок на электростанциях и объектах промышленной и муниципальной энергетики, руководстве сотрудниками, аспирантами и студентами, выполнявшими работы по данной теме.

Публикации. Основное содержание диссертации представлено в 62 научных публикациях, в том числе в монографии (в соавторстве), учебнике (в соавторстве), двух учебных пособиях, 10 публикациях в центральной печати и 9 за рубежом.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 8 глав, выводов, списка литературы из 233 наименований, приложений, изложена на 329 страницах машинописного текста, включает 23 таблицы и 134 иллюстрации. Структура выполненной работы представлена на рис. 1.

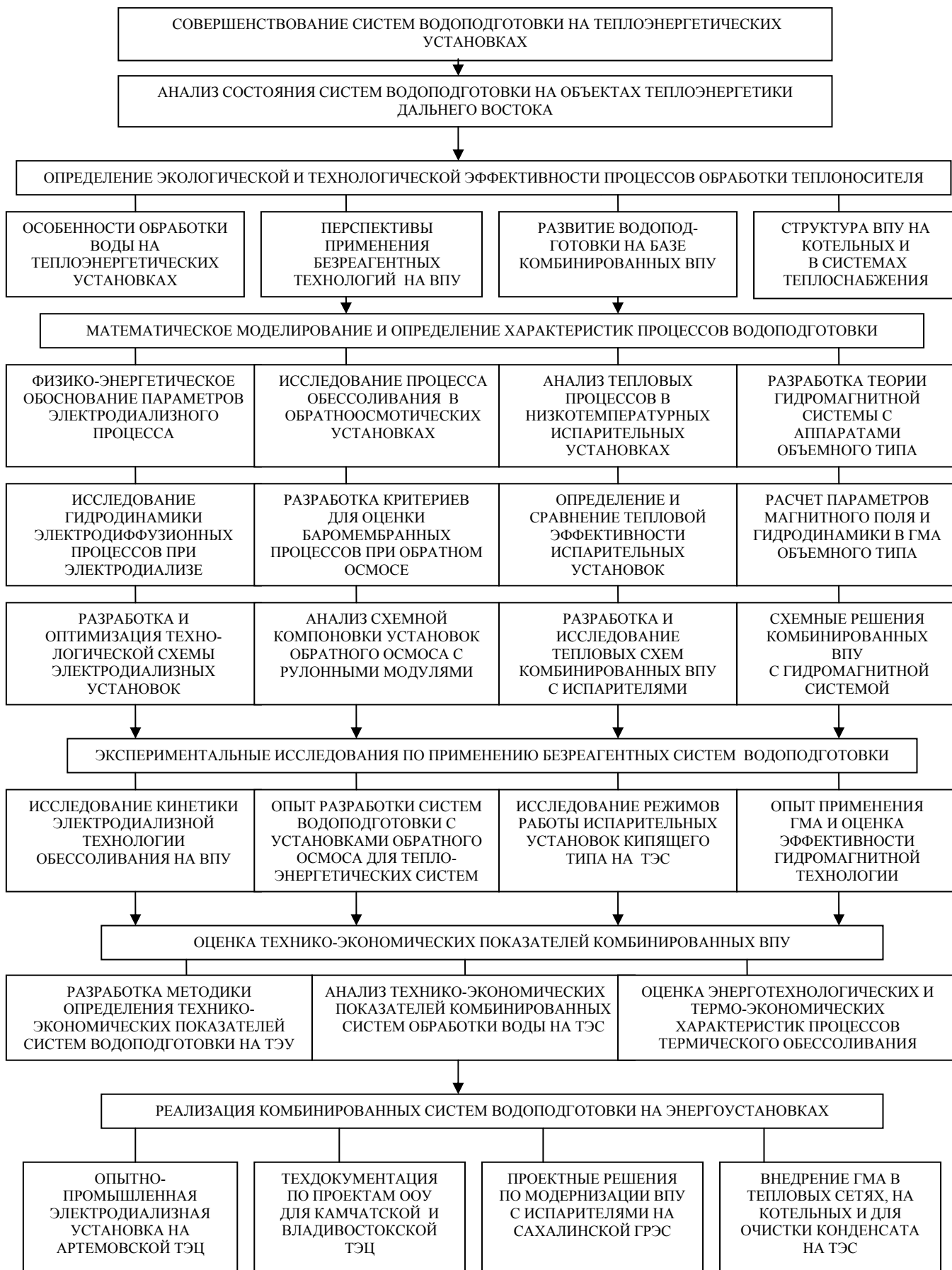


Рис.1. Структурная схема выполненной работы

На защиту выносятся:

1. Результаты комплексной оценки состояния систем водоподготовки на теплоэнергетических объектах Дальневосточного региона и обоснование методов их модернизации за счет применения мембранных технологий обессоливания воды на комбинированных ВПУ.

2. Конструкторско-технологические решения в виде схем и узлов комбинированных ВПУ для ТЭУ, включающих обратноосмотические и электродиализные установки, испарители, гидромагнитные системы обработки основных потоков теплоносителя, а также аппараты, обеспечивающие утилизацию и переработку экологически опасных стоков энергетических предприятий.

3. Результаты математического моделирования и оценки энерготехнологических характеристик процессов электродиализного и обратноосмотического обессоливания, устанавливающие связь между физическими и гидродинамическими параметрами мембранных систем при оптимальных режимах обработки воды применительно к различным схемам обессоливающих установок.

4. Результаты экспериментальных исследований кинетики электродиализного процесса и оценки эффективности технологии обратного осмоса при их комбинировании с установками ионного обмена или испарительными системами, а также рекомендации по внедрению мембранных установок на ряде тепловых электростанциях Дальневосточного региона России.

5. Результаты исследования процессов термического обессоливания в низкотемпературных испарителях на основе математического моделирования и разработки технологических решений в виде комбинированных испарительных установок для ТЭС и рекомендации по модернизации ВПУ, полученные при проведении промышленных испытаний и расчетов тепловых схем энергоблоков электростанций.

6. Проектные и конструкторские решения для специализированных гидромагнитных систем, повышающих технологические и экономические показатели комбинированных ВПУ. Результаты внедрения магнитных аппаратов и нормативы, регламентирующие применение гидромагнитной технологии на различных ступенях подготовки воды на ТЭУ, а также результаты оптимизации магнитных и гидродинамических характеристик разработанных аппаратов.

7. Результаты анализа, выполненного на базе современной методики определения технико-экономической эффективности комбинированных систем водоподготовки, сравнения структуры издержек, энерготехнологических и термо-экономических характеристик ВПУ, рекомендуемых к внедрению на энергетических предприятиях Дальневосточного региона.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и связанные с ее реализацией научные и технические задачи. Определена новизна и практическая значимость работы. Приведены сведения о практической реализации результатов.

В первой главе «Анализ процессов водоподготовки на теплоэнергетических установках» на основе полученных данных по эксплуатации ВПУ и выполненного комплекса исследований, определены основные особенности, характерные для водообеспечения теплоэнергетических установок, оснащенных традиционными реагентными системами для обработки воды.

Исследованиями подтверждено, что к основным недостаткам химических технологий обработки воды следует отнести большие затраты реагентов на осветление и обессоливание воды, использование дорогостоящих ионообменных материалов в засыпных фильтрах, значительный расход воды на собственные нужды, низкий уровень автоматизации и экологической безопасности. Отмечено, что полная замена применяемых систем обработки воды на ТЭУ в настоящее время невозможна по экономическим и технологическим причинам (из-за непрерывности процесса производства электроэнергии и теплоты). Применима только ступенчатая реконструкция ВПУ при сохранении действующих систем в качестве резерва.

Оценка структуры технологических схем водоподготовки с учетом изменений требований качеству теплоносителя по паро-водяному тракту на ТЭС Дальневосточного региона показала, что безотлагательно требуется введение в состав ВПУ дополнительных узлов для обработки воды на базе мембранных электродиализных или обратноосмотических модулей для начального обессоливания теплоносителя. Этот вывод подтвержден данными многолетних исследований сезонных изменений показателей качества исходной воды, потребляемой крупными электростанциями из поверхностных источников водоснабжения, а также специфических характеристик артезианских вод, которые на Дальнем Востоке являются основным водным ресурсом для объектов «малой» теплоэнергетики.

Рассмотрена структура перспективных схем ВПУ для ТЭС на основе комбинирования мембранной технологии и термических методов обессоливания. Приведены базовые показатели комбинированных ВПУ, подтверждающие возможность повышения экономических, технологических и экологических характеристик систем водоподготовки.

Теоретически и экспериментально подтверждено, что часть проблем по организации водоподготовки на котельных и в тепловых сетях решается за счет оснащения ВПУ аппаратами безреагентной обработки воды. Это значительно уменьшает количество требуемого водоподготовительного оборудования, сокращает затраты теплоты и воды на собственные нужды и существенно снижает расход реагентов, применяемых при умягчении воды.

В результате обследования действующих водоподготовительных систем установлено, что для крупных производственных котельных Дальневосточного региона, оснащаемых турбинами противодавления собственных нужд, перспективной являются ВПУ с малогабаритной испарительной установкой. Для котельных с рабочим давлением пара до 4,0 МПа в случае необходимости обеспечения высокого качества пара на технологические нужды (на мини-ТЭЦ), а также при экологических ограничениях по сбросу солевых регенеративных стоков из ВПУ рекомендованы схемы с умягчением воды в мембранных обессоливающих аппаратах. В разработанных схемах комбинированных ВПУ для котельных рекомендовано использовать специальную гидромагнитную технологию для повышения эффективности обработки исходной воды, питательной воды котлов и испарителей, а также подпиточной воды, направляемой в сетевой контур.

На основе выполненного анализа особенностей использования водных ресурсов на ТЭУ в Дальневосточном регионе поставлена и решена задача разработки структурных изменений схем ВПУ и технологических решений, направленных на совершенствование процессов водоподготовки в теплоэнергетике.

Во второй главе «Теоретические основы технологии электродиализа» дано обоснование математической модели, описывающей энергетическое взаимодействие электрического поля и системы слабый электролит - ионоселективная мембрана. При моделировании оптимизированы режимы работы электродиализной установки, разработана методика расчета надежности электродиализных модулей при их различной схемной компоновке. С учетом технологических факторов, влияющих на процесс обессоливания воды, определены условия сочетаемости электродиализа с традиционными методами водоподготовки.

Удельный расход энергии является важнейшим показателем работы электродиализных установок (ЭДУ). Он зависит от глубины обессоливания, а реальные затраты связаны с электрическими параметрами электродиализного модуля и особенностями от его конструкции. При известных начальном C_n и конечном C_d солесодержании воды оптимизация работы ЭДУ сводится к снижению потери напряжения в электролите, мембранах, на аноде и катоде, а также к повышению коэффициента выхода по току $\eta_э$, оценивающего технологическое совершенство модуля ЭДУ. Установлено, что для снижения энергопотребления необходимо, чтобы мембраны, применяемые на ЭДУ, обладали высокой электропроводностью и большим сопротивлением диффузии противоионов, что достигается применением многокамерных модулей.

Методика расчета связывает глубину обессоливания ΔC в ЭДУ с количеством ступеней обработки и производительностью установки. При исследованиях найдена зависимость для определения значения оптимальной величины плотности $i_{\text{опт}}$ тока с учетом селективности мембран $\varphi_m = \Delta C / C_n$ и энергетических затрат:
$$i_{\text{опт}} = \frac{i(1 - \ln(\varphi_m))}{\eta_э}$$

Непроизводительные потери энергии в модуле ЭДУ оцениваются величиной коэффициента выхода по току η_{Σ} .

При сравнении оптимальной и полученной расчетной величины коэффициента выхода по току (рис. 2) установлено, что снижение η_{Σ} в процессе эксплуатации обусловлено прежде всего возникновением концентрационной поляризации. Удельное потребление энергии в условиях поляризации быстро возрастает с увеличением солевого содержания исходной воды, и допустимый экономический предел

составляет приблизительно 5 ÷ 6 г/л, в то время как для продукта невыгодно понижение солевого содержания ниже 300 мкг/л, поскольку при этом существенно повышается сопротивление воды при прохождении тока.

Из модели процесса следует, что при характерном для теплоэнергетических обессоливающих систем значительном снижении концентрации солей в обработанной воде, основным параметром, влияющим на расход электроэнергии, является значение начального солевого содержания обрабатываемой воды C_n . Производительность модуля ЭДУ напрямую зависит от силы тока, протекающего через камеры, так как этот параметр определяет интенсивность ионного переноса в системе.

С учетом взаимосвязей между характеристиками процесса электролиза предложено ввести в систему расчета параметров ЭДУ интегральный коэффициент K_v , влияющий на допустимую плотность тока, характерную для начала поляризации мембран $i_{кр} = C_d \left(\frac{V_n}{K_{v,x}} \right)^{2(1-\omega)}$. Значение

допустимой скорости среды V_n по координате направления потока x в камере модуля ЭДУ устанавливается с учетом гидродинамических характеристик потока, зависящих от конструктивных особенностей рассчитываемого аппарата. Решение задачи сведено к уточнению величины эмпирического коэффициента K_v и показателя ω , учитывающего турбулентность движения среды, влияние ламинарного подслоя на диффузионный процесс и другие факторы, рассматриваемые в работе.

Как видно из представленной выше зависимости, величина $i_{кр}$ определяется в основном развитием конвекции и природой обрабатываемого раствора. Установлено, что критический поляризационный слой возрастает при увеличении толщины пограничного слоя и повышении глубины обессоливания. Его уменьшение возможно при импульсном снижении напряжения на электродах, повышении турбулентности потока, а также периодическом

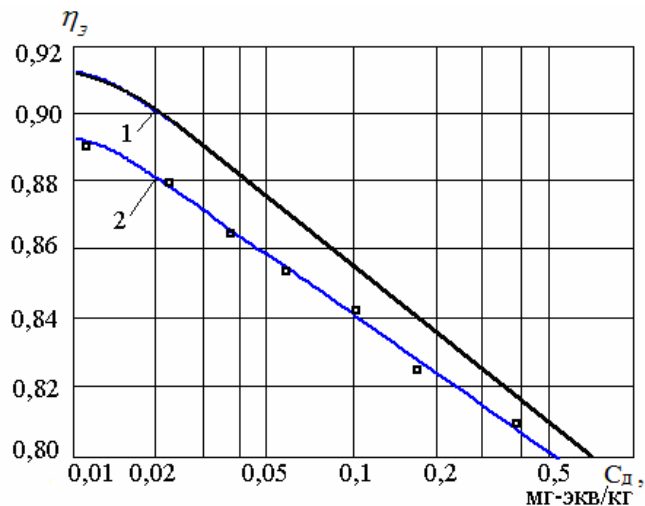


Рис. 2. Зависимость коэффициента выхода по току от солевого содержания дилуата:

- 1 – оптимальное значение;
- 2 – экспериментальные данные

изменении полярности на электродах. Разработанная методика позволяет также осуществлять выбор типа мембран для ЭДУ в соответствии со свойствами воды и производительностью установки (рис 3).

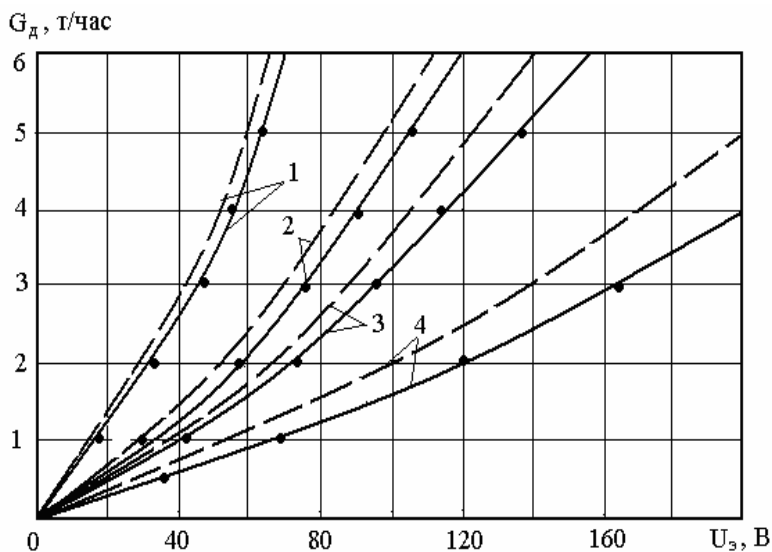


Рис. 3. Зависимость расхода дилуата через ЭДА от напряжения питания при $C_{н}/C_{д} > 10$: 1 - $\phi_m = 0,5$; 2 - $\phi_m = 0,7$; 3 - $\phi_m = 0,75$; 4 - $\phi_m = 0,8$; - - - - расчет; —•— эксперимент

Для любого класса ионов при расчете плотности тока можно использовать уравнение Нернста-Планка, описывающее перенос катионов и анионов в условиях конвекции.

Найдено его решение в виде степенной функции (1) для расчета изменения концентрации в пограничном слое мембраны, имеющем придельную величину C_m , при толщине пограничного слоя δ_x

$$C = C_d + (C_m - C_d) \left(\frac{y}{\delta_x} \right)^{2(1-\omega)} \quad (1)$$

Зависимость (1) определяет связь между током поляризации и толщиной пограничного слоя, а также степенью турбулентности потока $\omega = \delta_{хт}/\delta_{хл}$.

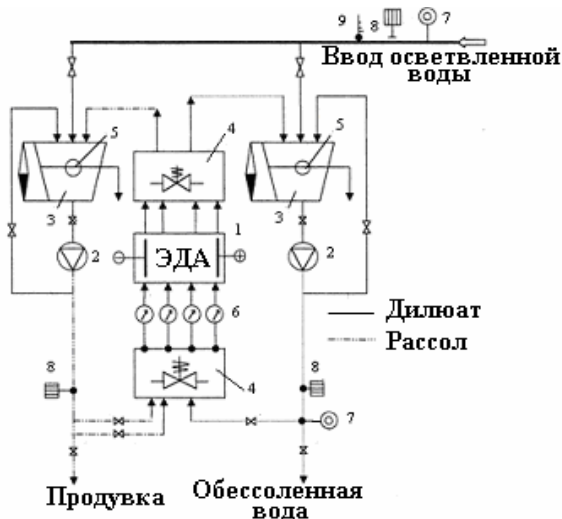
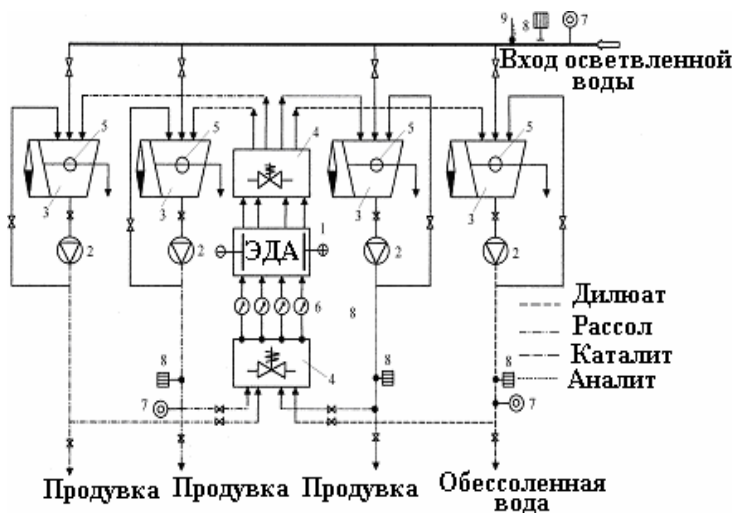


Рис. 4. Схема циркуляции ЭДУ типа «АКВАМИН» при двух независимых потоках: 1 – электродиализный аппарат; 2 – насосы; 3 – баки; 4 – реверсивные клапаны; 5 – уровнемеры; 6 – манометры; 7 – расходомеры; 8 – солемеры; 9 – термометр



5. Схема циркуляции в ЭДУ типа «АКВАМИН» при четырех независимых потоках

В работе выполнен анализ предлагаемых гидравлических схем электродиализной установки типа «АКВАМИН» для обессоливания воды с низкой минерализацией, характерной для теплоэнергетики (рис. 4 и 5).

Установлено, что глубина обессоливания воды в многопоточных схемах достигает $\varphi_m = 80 - 90\%$.

Для Артемовской ТЭЦ разработана гидравлическая схема с узлами управления и контроля ЭДУ для обессоливания воды по принципу двух независимых потоков (рис. 4). Такая схема имеет технико-экономические преимущества перед многопоточными схемами. Ее применение обусловлено использованием для обессоливания исходной воды низкой минерализации без солей жесткости, при этом ЭДУ требует меньше энергетических затрат и материалов. Она эффективна при невысокой жесткости исходной воды (0,5 – 1,5 мг-экв/л). В двухпоточной схеме удаление солей производится за один проход, поэтому глубина обессоливания не превышает $\varphi_m = 50 - 60\%$.

Для Приморской ГРЭС предложена гидравлическая схема (рис. 5) с узлами управления и контроля электродиализной установкой обессоливания воды по принципу четырех независимых потоков. Четырехпоточная схема ЭДУ является более универсальной, но требует больших затрат электроэнергии при обессоливание исходной воды за счет увеличения количества насосов и развитого гидравлического тракта.

Таким образом, при моделировании энерготехнологических характеристик процесса электродиализа получены зависимости, позволяющие определять затраты энергии на обработку воды с учетом необратимых потерь при оптимальном режиме обессоливания и различных схемных решениях структуры ЭДУ.

В третьей главе «Особенности применения электродиализа на теплоэнергетических установках» представлены результаты экспериментальных исследований на опытно-промышленных электродиализных установках с модулями ЭДА-5 типа «АКВАМИН».

Эксперименты на опытно-промышленной электродиализной установке (рис. 6) включали: отработку вариантов технологических схем ЭДУ; исследование взаимодействия ЭДУ и традиционных типов ВПУ; разработку регламента эксплуатации аппаратов; подготовку нормативно-технической и проектной документации. Снижение солесодержания воды по ступеням фильтрации при испытаниях ЭДУ составляло: на 1 ступени до 60%, на 2 ступени до 80%, на третьей до 96%. Обессоливание осуществлено для исходной воды с общим солесодержанием от 100 до 500 мг/л. В рассмотренном диапазоне концентрации солей в исходной воде удельные энергетические затраты составили 0,16 – 0,26 кВт-ч/т получаемого продукта (рис. 7 и табл. 1).

В основную задачу испытаний ЭДУ входила оценка возможности замены первых ступеней Н- и ОН - ионного обмена или уменьшение нагрузки на ионообменную технологию обессоливания в целом. Установлено, что при применении простейшей одноступенчатой схемы обработки воды на электродиализных аппаратах перед ее подачей в ионообменные фильтры Н-катионирования и ОН-анионирования, расход кислоты и щелочи на регенерацию снижается на 60-70%, расход воды на собственные нужды ВПУ уменьшается вдвое, значительно снижается количество вредных производственных стоков.

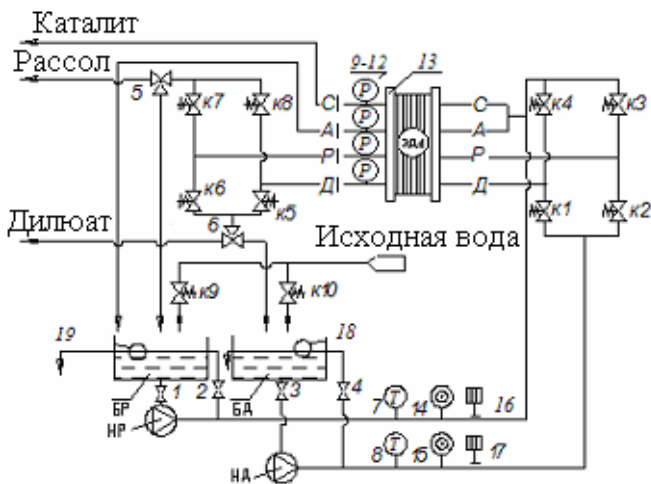


Рис. 6. Проектная схема ЭДУ-20 на Артемовской ТЭЦ с аппаратами типа «АКВАМИН»

1, 2, 3, 4 – регулирующие клапаны; 5, 6 – трехходовые регулирующие клапаны; 7 – 12 – манометры; 13 – электродиализные аппараты (8 единиц в одну или две ступени); 14, 15 – расходомеры; 16, 17 – солемеры; 18, 19 – регуляторы уровня; БР – бак рассола; БД – бак диллюата; НР – насос рассола; НД – насос диллюата

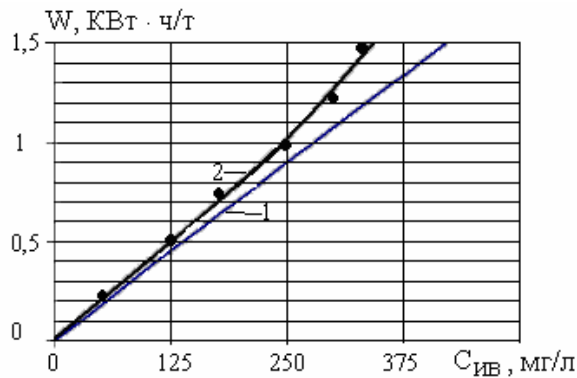


Рис. 7. Удельные затраты энергии на обессоливание воды в модуле ЭДА-5: 1 – расчет; 2 – эксперимент

Таблица 1.

Показатели установки ЭДУ-100 на испытаниях

№ п/п	Сила тока, А	Соленость, мг/л	Жесткость, мг-экв/л	pH
Исходная вода				
1.	-	240	3,6	7,0
Вода, обессоленная на ЭДУ-100				
2.	3	35	0,5	6,1
3.	5	20	0,3	6,0
4.	7	10	0,15	5,7
5.	8	7	0,10	5,5

Существующие методы борьбы с концентрационной поляризацией (подкисление рассола, совершенствование гидравлических систем и др.), не позволяют надежно избавиться от этого отрицательного эффекта. С целью определения режима работы ЭДУ при реверсировании тока для предотвращения эффекта концентрационной поляризации произведена экспериментальная проверка электродиализных модулей на опытно-промышленной установке ЭДУ-100. Для оптимизации режима реверсирования и предотвращения поляризации осуществлен выбор интервалов прямого и обратного импульсов. Таким способом регулирования достигнут широкий спектр параметров для эффективного ведения процесса электродиализа. Выбор интервалов для импульсного режима работы исследуемых аппаратов типа ЭДА осуществлялся с учетом особенностей их конструкции, различия режимов эксплуатации в летний и зимний периоды, технических характеристик модулей. Замеры различных режимов переполюсовки выполнены в течение полугода в интервалах температур от 75°C до 1,5°C при солесодержании от 150 до 2000 мг/л. Длительность обратных импульсов устанавливалась в пределах 0,3...0,8 с. (рис. 8 и 9).

Оценка влияния импульсного режима работы проведена в сравнении с традиционным способом ведения электродиализа при постоянном электрическом токе. Для проведения исследований использована штатная технологическая схема установки, оценка работы ЭДУ осуществлена по

качеству обработанной воды и энергозатратам. Установлено, что реверс тока исключает влияние повышения минерализации в рабочем тракте ЭДУ на поляризацию мембран.

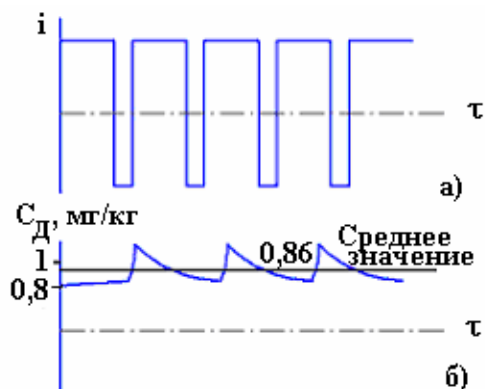


Рис. 8. Режим работы ЭДУ:

а – изменение тока реверса на тиристорных выпрямителях; б – изменение солесодержания дилуата

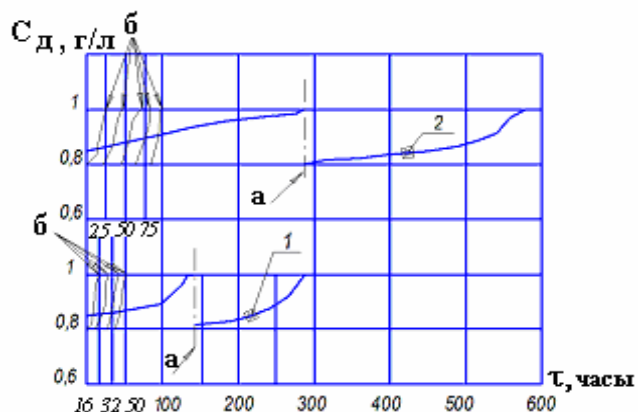


Рис. 9. График изменения солесодержания на выходе ЭДА в режиме «импульс» (1 – летом, 2 – зимой): а) переполюсовка со сменой гидравлического режима; б) режим постоянного тока.

Исследованный режим работы электродиализных аппаратов типа «АКВАМИН» при реверсировании тока позволяет управлять процессом обессоливания путем изменения величины напряжения в импульсе и длительности импульса и бороться с осадкообразованием на мембранах. При наличии на ТЭС электроэнергии невысокой себестоимости, применение ЭДУ экономически оправдано, если их устанавливать в комбинированных схемах ВПУ. Исследованиями подтверждено, что рассмотренные электродиализные установки эффективны при невысокой концентрации солей в исходной воде, характерной для ТЭУ Дальневосточного региона.

Однако, учитывая сложную гидравлическую схему ЭДУ и трудности реализации процесса реверсирования, следует в качестве более эффективного варианта применения мембранных технологий рассматривать возможность их замены ООУ.

В четвертой главе «Теоретические основы технологии обратного осмоса» произведена оценка основных показателей обратноосмотических установок, выполнен комплекс аналитических исследований для определения условий применения технологии мембранного обратноосмотического обессоливания на ТЭУ и на базе предложенных модельных и эмпирических уравнений дано обоснование теоретических приложений, используемых для расчетов характеристик обратноосмотического процесса.

В рассмотренной в работе модели мембранной осмотической системы (рис. 10) за исследуемые показатели приняты скорость фильтрации $J_{\Pi} = G_{\Pi}/F_{\Pi} \rho_{\Pi}$, селективности мембран $\phi_{\Pi} = (1 - C_{\Pi}/C_{\Pi})$, коэффициенты извлечения $\psi = G_{\Pi}/G_{\Pi}$ и концентрирования $\theta = G_{\Pi}/G_{\Pi}$. Удельная производительность осмотической установки, действующей при избыточном давлении ΔP_{Π} , связана с

коэффициентом водопроницаемости j_m при обратном осмосе и селективностью мембран зависимостью $J_{\pi} = j_m \Delta P_M / \varphi_M^{(1-\omega)}$.

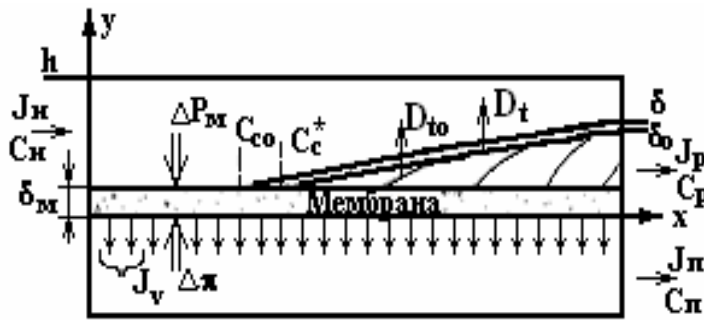


Рис 10. Принципиальная схема расчета мембранной осмотической системы

При решении уравнений солевого и материального баланса в рассмотренной модели осмотической системы использованы базовые соотношения между концентрациями солей в исходной воде, пермиате и концентрате в виде степенных функций:

$$C_p = C_n (1 - \psi)^{-\varphi}, \quad C_{\pi} = C_n (1 - \varphi_M) (1 - \psi)^{-\varphi}, \quad C_c^* = C_n [1 - (1 - \psi)^{-\varphi}] / \psi. \quad (2)$$

Поскольку процесс обратного осмоса протекает без фазовых превращений, то затраты энергии на обессоливание приравнены к минимальной термодинамической работе. Максимальная величина коэффициента селективности при использовании энергетической функции, связывающей концентрации солей в пермиате и исходной воде с вероятностью нахождения ионов в растворе на заданном энергетическом уровне, может быть выражена в виде $\varphi_M = 1 - \exp[\Delta W / (K_6 T)]$, где ΔW – доля энергии осмотического процесса, расходуемая на перемещение ионов через мембрану, K_6 – постоянная Больцмана. При моделировании подстановка $\Delta W = W_{\min}$ позволяет учесть рост селективности мембран за счет увеличения активности ионов солей в растворе при изменении уровня энергии, затрачиваемой в процессе обратного осмоса и возрастании температуры среды.

На увеличение энергетических затрат при водоподготовке обратным осмосом, как и при электродиализе, влияет концентрационная поляризация, которая ухудшает качество воды из-за проскока растворенных веществ, способствует отложению солей на поверхности мембраны с последующим уменьшением скорости фильтрования. Уровень концентрационной поляризации при обратном осмосе определяется коэффициентом $K_c = C_M / C_c^*$.

При известном коэффициенте массопереноса K_t в примембранном слое и заданной селективности мембран φ_M значение K_c найдено аналитически

$$K_c = \frac{\exp\left(\frac{J_{\pi}}{K_t}\right)}{\varphi_M + (1 - \varphi_M) \exp\left(\frac{J_{\pi}}{K_t}\right)}. \quad (3)$$

Решение дифференциальных уравнений для модели обратноосмотической системы с использованием преобразования Лапласа позволяет установить величину изменения концентрации солей у мембраны C_M в нестационарном

Для данной модели эмпирический коэффициент ω зависит от изменения физических свойств материала мембраны и гидродинамики процесса обратного осмоса. Для «идеальной» мембраны

$$\varphi_M = 1 \text{ и } J_v = j_m \Delta P_M.$$

процессе при допущении идеальности ее свойств и известной средней концентрации солей в обрабатываемой воде C_c^* :

$$C_m = C_c^* \frac{1+2A}{1+A} \exp [A (1+A) \tau_0], \quad (4)$$

На рис. 11 представлен расчет изменения концентрации солей около мембраны как функция безразмерного времени τ_0 для различных значений A (обобщающей характеристики мембраны) и при заданных значениях безразмерной толщины пограничного слоя d_{0c} . Найдено также выражение для коэффициента поляризации K_c , анализ которого показывает, что интенсивность поляризационной концентрации пропорциональна времени процесса. При уменьшении селективности мембраны φ_m время до наступления поляризации существенно возрастает.

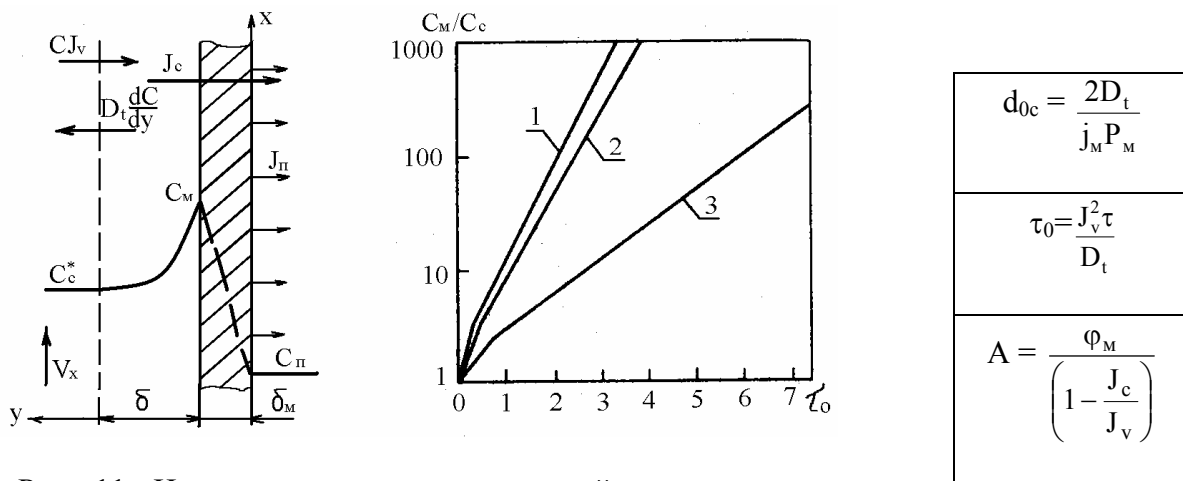


Рис. 11. Изменение концентрации солей: в пограничном слое и как функции безразмерного времени:

1 – $A = 1$; 2 – $A = 0,9$; 3 – $A = 0,5$

В соответствии с принятой моделью осмотического процесса (рис. 10 и 11) изменение концентрации солей у поверхности мембраны равно

$$C = C_{\Pi} + (C_c^* - C_{\Pi}) \exp\left(\frac{J_v}{K_t} \frac{y}{\delta}\right). \quad (5)$$

Применяя критерий Шмидта $Sc = \frac{\nu}{D_t}$, оценивающий влияние свойств среды на диффузионные процессы, для расчета коэффициента массопереноса, при $Re_x = \frac{2LV_{xc}}{\nu}$ получаем

$$K_c = \frac{C_m}{C_c^*} = \exp\left(\frac{0,16 J_v Re_x^{\frac{1}{4}} Sc^{\frac{2}{3}}}{V_{xc}}\right). \quad (6)$$

Рассмотренная в главе модель позволяет применить число Шервуда $Sh = \frac{2hK_t}{D_t}$, для расчетов поляризационной концентрации $K_c = \exp\left(\frac{Os}{Sh}\right)$.

Соотношение $Os = \frac{2hJ_v}{D_t}$ является предложенным автором критерием для оценка массоперенос в осмотической системе, объединяющей диффузионный слой и мембрану. Осмотический критерий Os связан с числом Шмидта и примембранным числом Рейнольдса $Re_y = \frac{2hJ_v}{v}$, при этом $Os = Sc Re_y$.

Из полученных теоретических результатов видно, что для любого режима распределение концентраций в пограничном слое при поляризации зависит от соотношения чисел Os и Sh . Для расчета коэффициента поляризации применены известные эмпирические уравнения для критерия Шервуда, найденные по аналогии с процессами теплообмена.

Режим	Ламинарный	Турбулентный
Одномерная задача	$Sh = 1,66 Re_x^{0,36} Sc^{0,34} (2h/L)^{0,42}$	$Sh = 0,073 Re_x^{0,74} Sc^{0,34} (2h/L)^{0,32}$
Двухмерная задача	$Sh = 4,72 Re_x^{0,36} Sc^{0,34} Os^{0,25} (2h/L)^{0,42}$	$Sh = 0,147 Re_x^{0,74} Sc^{0,34} Os^{0,19} (2h/L)^{0,32}$

При подстановке приведенных эмпирических зависимостей в формулу $K_c' = \exp\left(\frac{Os}{Sh}\right)$ получен конечный результат, близкий к теоретической функции (6) при $\varphi_m = 1$.

В условиях эксплуатации селективность $\varphi_m < 1$, поэтому вводится поправка, тогда $K_c = \frac{K_c'}{\varphi_m + (1 - \varphi_m)K_c'}$ или расчет K_c производится через числа Os и Sh .

В работе предложен интегральный критерий $Kr_1 = 1 - \frac{(K_c - 1)K_\pi C_c^*}{\Delta P_m}$, учитывающий связь коэффициента концентрационной поляризации K_c с процессом обессоливания: $J_\pi = J_v' Kr_1$, откуда следует, что влияние поляризации на производительность осмотической установки увеличивается при повышении средней концентрации солей в обрабатываемой воде и уменьшается при увеличении рабочего давления.

Влияние явления изменения структуры мембраны (крипа) под действием высокого давления учтено поправкой $J_v' = Kr_2 J_v''$. Уменьшение потока за счет сжатия мембраны описано степенной функцией вида $Kr_2 = K_m [1 - (\tau/\Delta t)^{m-1}]$, где Kr_2 – критерий, учитывающий влияние на скорость фильтрования мембран деформационных процессов, зависящий от свойств мембраны и интенсивности процесса сжатия; τ – длительность процесса; Δt – период работы обратноосмотической установки с максимальной (проектной) начальной производительностью J_v'' ; m и K_m – характеристики сопротивления сжатия мембраны, зависящие от ее пористости и величины допустимой деформации.

Допустимая точность оценки влияния осадкообразования на течение процесса обратного осмоса достигается при учете гидравлических характеристик мембран. При известных коэффициентах сопротивления мембраны ξ_M и осадка ξ_o'' скорость фильтрации находится за счет введения поправки $J_v''' = J_v'' Kr_3$, где критерий $Kr_3 = \frac{\mu_o(\delta_o \xi_o'' + \delta_M \xi_M)}{J_M}$ позволяет учитывать

влияние толщины слоя осадка δ_o на производительность установки.

Сравнение представленных результатов без учета эффектов обратных связей между факторами, влияющими на скорость фильтрования через мембраны обратноосмотической установки, показывает, что величина потока через мембрану равна

$$J_{\Pi} = J_v Kr_1 Kr_2 Kr_3 / \varphi_M^{(1-\omega)}. \quad (7)$$

В данной главе рассмотрена гидродинамика потоков в установках обратного осмоса, которая позволяет оценить потери скорости по всей длине и изменение средней скорости в канале V_{cp} при заданном профиле скорости в канале $V_{cp}/\Delta V$ (рис. 12) При заданном режиме течения потеря напора в модуле рассчитывается по формуле

$$\Delta P_L^* = \Delta P_L \left(1 + a \left(\frac{V_{cp}}{\Delta V} \right)^b \right), \quad (8)$$

где ΔP_L – приведенное значение гидравлического сопротивления модуля при $V_{cp}/\Delta V = 0$.

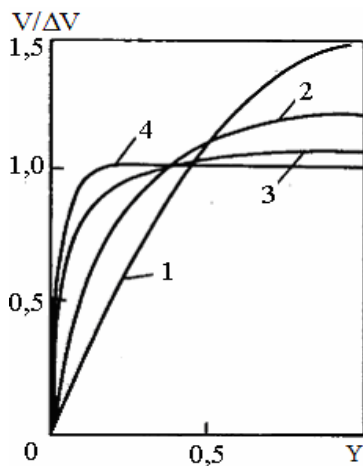


Рис. 12. Профиль скорости при течении в канале мембраны: 1 – $F_h = 0$; $Re_y = 0$; 2 – $F_h = 10$; $Re_y = 10$; 3 – $F_h = 1$; $Re_y = 1000$; 4 – $F_h = 1000$; $Re_y = 1$
($Re_y = \gamma V_y^* h / \nu$; $F_h = \gamma h^2$)

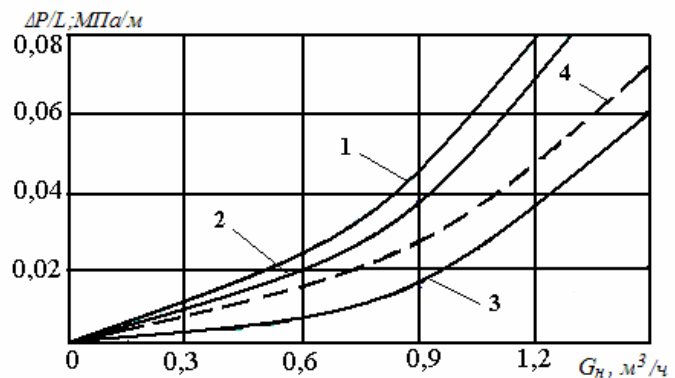


Рис. 13. Изменение гидравлического сопротивления по длине рулонного модуля: 1 – модуль фирмы «Фильмтек»; 2 – модуль фирмы «Флюид системс»; 3 – модуль фирмы «Гидронавтикс»; 4 – расчетное значение по уравнению (8)

В большинстве случаев для ООУ коэффициенты a и b в формуле (8) находятся по эмпирическим данным, полученным при испытаниях модулей

различных видов в условиях, близких к эксплуатационным. На рис. 13 показано изменение гидравлического сопротивления по длине рулонного модуля. Полученное теоретическое решение (8) для величины $\Delta P/L$ дает близкое совпадение с данными опытно-промышленных испытаний обратноосмотических модулей известных зарубежных фирм.

Исследования показывают, что способ соединения модулей ООУ зависит от требований к конечному продукту, характеристик исходного потока воды, её давления и других факторов. Применение параллельно-последовательной комбинированной схемы подключения модулей позволяет достичь высокой степени обессоливания воды в широком интервале нагрузок.

Для теплоэнергетических установок оптимизация схемы подключения модулей ООУ заключается в определении условий получения заданного количества пермиата при допустимом его солесодержании. Пологая, что селективность мембран $\phi = 1 - C_p/C_p$ по ступеням обработки не изменяется, так как слабо зависит от концентрации солей в рассоле и пермиате (что характерно для большинства ТЭУ), для каждого модуля применяются свой коэффициент извлечения $\psi = G_p/G_n$ и коэффициенте концентрирования $\theta = 1 - \psi$.

Для оптимизации схем ООУ использованы соотношения для определения солесодержания потоков в ООУ при заданной компоновке модулей

$$C_p = C_n (1 - \psi)^{-\phi} = C_n \theta^{-\phi}; \quad C_n = \frac{C_n(1 - (1 - \psi)^{1-\phi})}{\psi} = \frac{C_n(1 - \theta^{1-\phi})}{1 - \theta}.$$

Для схемы обратноосмотической установки любой конфигурации предложено комплексное уравнение, связывающее солесодержание получаемого пермиата и солесодержание исходной воды:

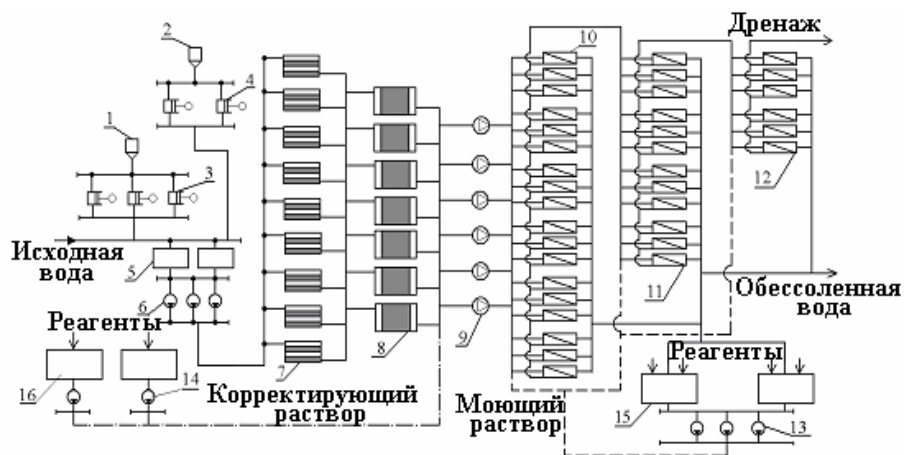
$$C_n = \frac{C_n \left(1 - \sum_{i=1}^n \theta_i + \sum_{i=1}^n \theta_i \theta_n \right)}{1 - \sum_{i=1}^n \theta_i^{(1-\phi)} + \sum_{i=1}^n \theta_i^{(1-\phi)} \theta_n^{(1-\phi)}} \prod \left[\frac{1 - \theta_i^{(1-\phi)}}{1 - \theta_i} \right]. \quad (9)$$

По рассмотренной методике находится общее потребное количество модулей $n_m = G_p/G_{p1}$ и количество модулей в последней по ходу концентрата ступени $n_n = G_p/G_{p1}$, а также во всех предыдущих

$$n_i = n_n + \sum_{i=1}^n n_{i+1} \left(\frac{G_{n1}}{G_{p1}} \right) = n_n + \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_{i+1}}{\theta_1} \right).$$

Из сопоставления различных вариантов схем установлено, что для теплоэнергетики предпочтительной является каскадная двух или трехступенчатая схема установки (рис. 14). Для оптимизации структуры ООУ требуется снижать количество модулей в каждой последующей ступени с соблюдением соотношения $G_{ni}/n_i = \text{const}$, где n_i – количество модулей в i -той ступени обессоливания, G_{ni} – расход среды через модуль.

Рис. 14. Принципиальная схема ООУ с тремя ступенями модулей: 1, 2 – баки раствора коагулянта и флокулянта; 3, 4 – насосы-дозаторы; 5 – баки осветленной воды; 6 – насосы осветленной воды; 7 – механические фильтры; 8 – фильтры тонкой очистки; 9 – насосы высокого давления; 10 – осмотические модули первой ступени; 11 – осмотические модули второй ступени; 12 – осмотические модули третьей ступени; 13,14 – насосы промывки; 15,16 – баки промывного раствора



Установлено, что выбор рациональной структуры ООУ гарантирует требуемые показатели работы обратноосмотической установки. При использовании двух- и трехступенчатых схем и высокой селективности мембран в модулях достигается глубина обессоливания, приемлемая для котлов ТЭУ при давлении пара до 9 МПа. На ООУ с одним проходом теплоносителя качество обессоленной воды удовлетворяет котельные агрегаты малой энергетики и тепловые сети.

Пятая глава «Особенности технологии обратного осмоса на теплоэнергетических установках» посвящена разработке рекомендаций и технических решений по применению ООУ в системах подготовки воды на ТЭУ. Их предложено включать как первую ступень обессоливания перед ионообменными фильтрами или испарителями. Непосредственное использование умягченной воды после ООУ рекомендуется на котельных и для подпитки тепловых сетей.

Анализ характеристик установок этого типа показал, что ООУ имеют ряд преимуществ перед ионообменными системами обессоливания: обеспечивают снижение количества стоков (при пересчёте на ПДК) в 2,2 - 2,5 раза, уменьшение расхода дорогостоящих реагентов на 70 - 90 %, снижение эксплуатационных затрат на 60 - 70%, уменьшение производственных площадей под ВПУ при высокой автономности, простоте эксплуатации и возможностью полной автоматизации процесса.

Схема двухступенчатой ООУ предложена для Камчатской ТЭЦ. Базовым вариантом при разработке ООУ для Камчатской ТЭЦ были выбраны эксплуатируемые на ряде ТЭС модульные обратноосмотические установки, предлагаемые компаниями «Энергоэкосервис», «Воронеж-Аква» и «Гидротех». Энергопотребление установок такого типа находится на уровне 45 кВт при выходе пермиата 30 - 50 т/час с одного агрегатного блока модулей.

Комбинированная схема ВПУ с обратноосмотической установкой производительностью до 200 т/час пермиата разработана для Владивостокской ТЭЦ. В качестве базового оборудования приняты рулонные модули японской компании «Торей». Схема ООУ рассчитана для условий снижения нагрузки ионообменной части ВПУ при значительном сокращении расхода воды на собственные нужды и уменьшении экологически вредных стоков.

Установлено, что при пониженном солесодержании исходной воды за ООУ нецелесообразно эксплуатировать старую двухступенчатую схему химического обессоливания. Поэтому технология ионного обмена упрощается до одноступенчатой схемы с Н- и ОН- фильтрами или с ФСД.

В главе рассматриваются особенности эксплуатации ООУ и режимы их работы на теплоэнергетических объектах; приводятся методы интенсификации обратноосмотического процесса при применении многоступенчатых схем обработки воды в ООУ; исследованы эксплуатационные показатели установок по расходу электроэнергии в зависимости от ее производительности и рабочего давления P_n на входе в аппарат $W_э = G_n P_n / (\psi \eta_n)$, где η_n – КПД насосной установки; приведены рекомендации по структуре фильтрационных систем, используемых в схемах ООУ для осветления воды; предложены технологические методы борьбы с образованием отложений на поверхности мембран за счет поддержания в модулях установок оптимального уровня рН; установлено, что снижение рН в исходной воде позволяет повысить выход обессоленной воды с единицы объема модуля; то же самое имеет место при некотором допустимом увеличении температуры (до 35–45⁰С), а увеличение скорости потока снижает степень загрязнения мембран отложениями, значительно влияет на рабочий режим модуля и устойчивость его функционирования.

Для предотвращения накопления осадка в обратноосмотическом модуле разработана методика их промывки с оптимизацией межпромывочного периода и вида моющей среды в соответствии с исследованной поляризационной моделью объекта, основанная на предложенном нами системе уравнений изменения параметров ООУ, решение которых имеет трансцендентальный вид:

$$\frac{\Delta\tau_o}{J^{*2}} \frac{dJ^*}{dt} + J^* - K^* = K_{mo} \left(\frac{\tau}{\Delta\tau_o} \right)^{m-1}; \quad \ln \left(\frac{J^*(1-K^*)}{J^* - K^*} \right) - K^* \left(\frac{1}{J^*} - 1 \right) = \frac{K^{*2}\tau}{\Delta\tau_o}. \quad (10)$$

При известных начальных условиях, определяющих изменение значений производительности J^* осмотического модуля и коэффициента $K^* = K_t/K_{t0}$ во времени, зависимости (10) решаются итерационным методом, что при обслуживании установки с помощью ПК позволяет следить за сроком очередной промывки установки $\Delta\tau_o$. Качество очистки поверхности мембран оценивается по увеличению производительности ООУ по пермиату. Рекомендуется использовать для этого коэффициент отмывки $R_o = (1 - J_{no}/J_n)$, где J_{no} – скорость фильтрации после заноса мембран отложениями солей.

Анализ предложенных к внедрению технических решений показывает, что современные комплексные ВПУ целесообразно формировать на основе сочетания ионообменных, термических и обратноосмотических ступеней обессоливания, что уменьшает конечную стоимость получаемой воды и снижает энергетические и ресурсные затраты на процесс водоподготовки.

Исследования и расчеты по двум базовым ТЭС использованы при разработке рекомендаций по внедрению установок обратного осмоса на тепловых электростанциях Дальневосточного региона.

Шестая глава «Исследование процессов термического обессоливания на тепловых электростанциях» содержит материалы по совершенствованию технологии водоподготовки при применении на ТЭС испарительных и опреснительных установок. Приводятся результаты анализа эффективности используемых на ТЭС термических обессоливающих установок, включающих аппараты кипящего типа, установки мгновенного вскипания (ИУМВ) и тонкопленочные испарительные установки (ТПИУ).

Отмечено, для теплоэнергетики характерны недорогие упрощенные системы термической дистилляции с поверхностными испарителями кипящего типа, в которых перерабатывают воду, прошедшую предварительную обработку (чаще всего умягченную на ионообменных фильтрах). В то же время сконструированы и выпускаются испарители, способные работать на сырой воде и загрязненных стоках систем водоподготовки на ТЭС.

Результаты исследований по оценке работы испарителей на ТЭС показали, что процессы термической дистилляции целесообразно использовать для водоснабжения Владивостокской ТЭЦ и других электростанций Дальневосточного региона, испытывающих дефицит в воде хорошего качества.

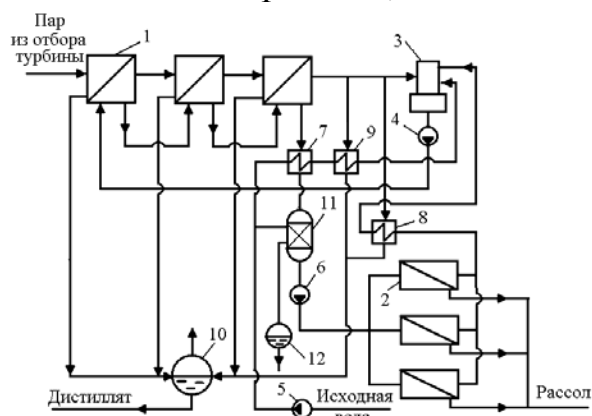


Рис. 15. Схема комбинированной ВПУ с испарительной и обратноосмотической установками: 1 – испаритель; 2 – модуль ООУ; 3 – деаэратор; 4 – насос деаэрированной воды; 5 – насос исходной воды; 6 – насос высокого давления; 7 – охладитель рассола; 8, 9 – регенеративные подогреватели; 10 – бак дистиллята; 11 – фильтр тонкой очистки; 12 – дренаж

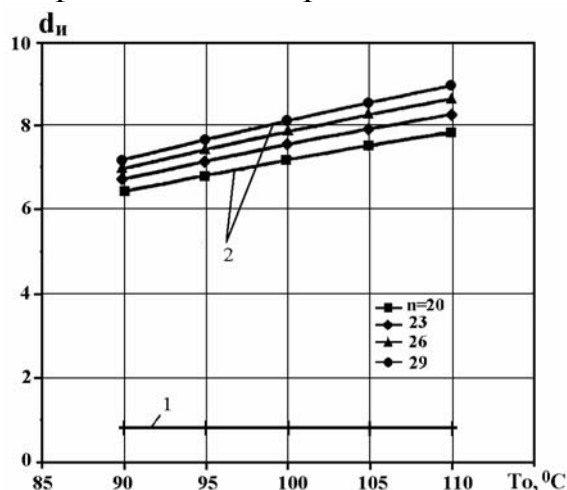


Рис. 16. Зависимость величин $d_{и1}$ от температуры нагрева исходной воды:

- 1 - при одной ступени испарения;
- 2 - при многоступенчатом испарении

В главе рассмотрены различные схемные решения для новых типов комбинированных испарительных установок, основанных на взаимодействии различных технологий обессоливания. Установлено, что при расширении действующих ИУ кипящего типа на ТЭС, целесообразно дополнять их ИУМВ или ТПИУ. В этом случае в 1,5 – 2 раза возрастает коэффициент относительной выработки дистиллята и существенно улучшаются технико-экономические показатели ВПУ. Для Сахалинской ГРЭС предложена как перспективная комбинированная схема ВПУ, в которой в качестве дополнительной ступени обессоливания используется обратноосмотическая установка (рис. 15).

Применение рекомендуемых комбинированных установок существенно изменяет методику анализа тепловой эффективности всех узлов ВПУ, действующих по принципу термической дистилляции. С целью уточнения характеристик комбинированных ВПУ с испарителями мгновенного вскипания и пленочными аппаратами произведен анализ показателей ИУ. Для этого на основе теплофизического моделирования исследованы основные варианты ИУМВ, работающие с одной ступенью испарения, многоступенчатые прямоточные установки, установки с рециркуляцией и дополнительными ступенями охлаждения. Основное внимание при исследовании ИУМВ уделено оценке влияния количества ступеней испарения и начальной температуры теплоносителя T_o , связанной с теплоперепадом на каждой ступени испарения $\Delta T_{ст} = (T_o - T_p)/n$, на технологические показатели испарителей.

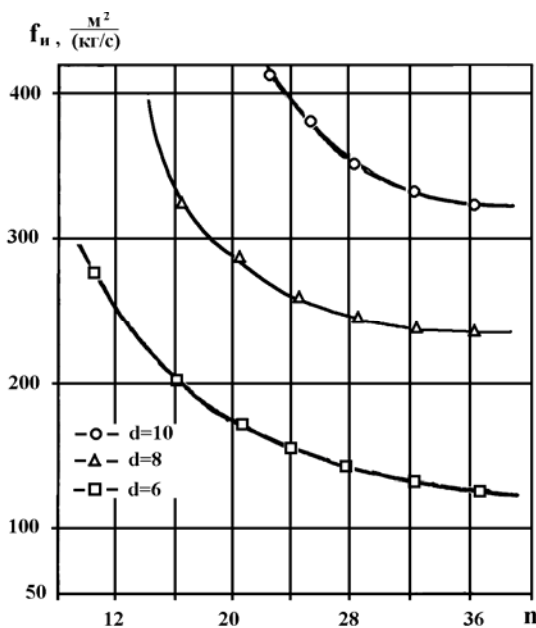


Рис.17. Связь удельной поверхности конденсаторов ИУ с коэффициентом выработки

Оценка эффективности ИУ основана на расчете расхода дистиллята с каждой ступени испарения

$$G_d = G_{ц} \left[1 - \left(1 - \frac{c_b \Delta T_{ст}}{r_{вп}} \right)^n \right], \text{ коэффициент}$$

относительной выработки дистиллята

$$d_{и} = \frac{r_{вп} \eta_{п}}{g_{ц} c_p n \Delta T_{ст}}, \text{ удельных затрат тепла}$$

$$q_{и} = \frac{g_{ц} c_p (T_o - t_1)}{\eta_{п}} \text{ и приведенной}$$

поверхности испарителя $f_{и} = n F_{ст} / G_d$.

Рекомендованы значения коэффициента $d_{и} = 6 - 8$, что позволило получить оптимальные размеры поверхностей теплообмена для эксплуатируемых на ТЭС испарителей. Показатели $d_{и}$ и $f_{и}$ работы испарителей представлены на рис. 16 и 17.

Выполненный анализ энергетических характеристик процессов дистилляции позволил сделать вывод, что установки мгновенного вскипания не достигли необходимого термодинамического совершенства, поэтому требуют уточнения влияния совокупности всех эксплуатационных факторов для получения на ИУ максимальной эффективности процессов дистилляции. Использование в работе достоверной математической модели процессов в ИУМВ, базирующейся на уравнениях межступенчатого теплового и материального балансов, позволило получить при оптимизации схем испарителей не только удельные показатели, но и выяснить их влияние на стоимостные составляющие установки.

Применение тонкопленочных испарительных установок на ТЭС эффективнее по сравнению с другими типами испарителей как с термодинамической, так и с теплофизической точек зрения. При анализе схем ТПИУ предложены методы решения оптимизационных задач с помощью

математического описания теплофизических процессов в испарителе, при этом дана оценка влияния различных факторов на их показатели при получении обессоленной воды на ТЭС. Режимные характеристики испарителя найдены из системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы в камерах ИУ применительно к модели одноступенчатой ТПИУ.

При решении уравнений варьировались режимные параметры динамической модели ТПИУ и с помощью ЭВМ определялись все отклонения, которые могут иметь место при эксплуатации испарительной системы.

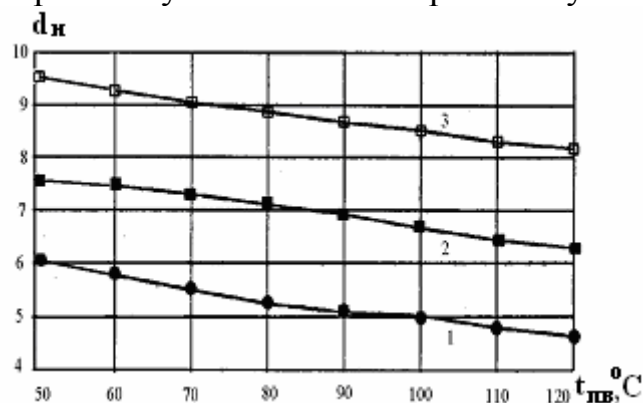


Рис. 18. Влияние температуры воды на входе в первую ступень на коэффициент выработки:

1 – $n = 6$; 2 – $n = 8$; 3 – $n = 10$

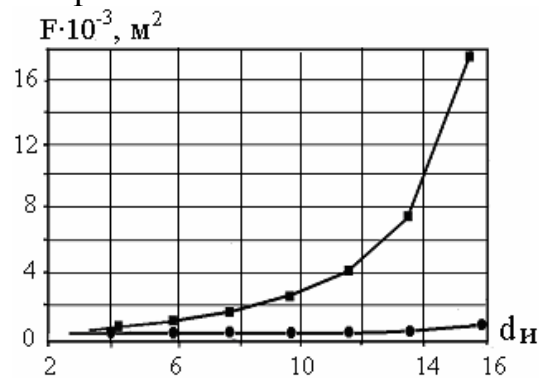


Рис. 19. Зависимость поверхности нагрева

ИУ от коэффициента относительной производительности: ● – ИУМВ; ■ – ТПИУ

Установлено, что при многоступенчатой схеме ТПИУ эффективность обессоливания существенно зависит от числа ступеней (рис. 18). С ростом температуры на первой ступени наблюдается уменьшение d_n , а наибольшее значение коэффициента удельной выработки соответствует большему числу ступеней.

Стоимость установок ИУМВ и ТПИУ в диапазоне $d_n = 2 - 8$ отличается незначительно, т.к. поверхности нагрева аппаратов сопоставимы по размерам (рис. 19). Для получения высоких показателей по производительности ИУМВ требуют более значительных капитальных затрат. Установлено, что приемлемое значение d_n в установках мгновенного вскипания можно получить лишь при очень большом числе ступеней в тепловой схеме (более 20), в то время как для пленочных аппаратов достаточно 4 - 6 ступеней. Поэтому ТПИУ рекомендованы для первоочередного использования в комбинированных схемах ВПУ для обессоливания или опреснения воды на ТЭС.

Длительный опыт эксплуатации испарительных установок на Сахалинской ГРЭС определил выбор ее тепловой схемы для исследования надежности и эффективности работы испарителей кипящего типа. Это позволило, одновременно с анализом состояния водно-химического режима ГРЭС, дать обоснование возможности применения испарительных установок различного типа на ТЭС Дальневосточного и других регионов, в том числе электростанциях морского базирования.

Обработка воды в термической обессоливающей установке является завершающей операцией на ВПУ Сахалинской ГРЭС. Здесь испарительная установка состоит из шести испарителей кипящего типа И-120, подключенных

к четвертому нерегулируемому отбору турбин К-50-90. Испарители по греющему пару связаны также с РОУ 100/13-8. Питательной водой для испарителей является умягченная вода после узла предварительной очистки.

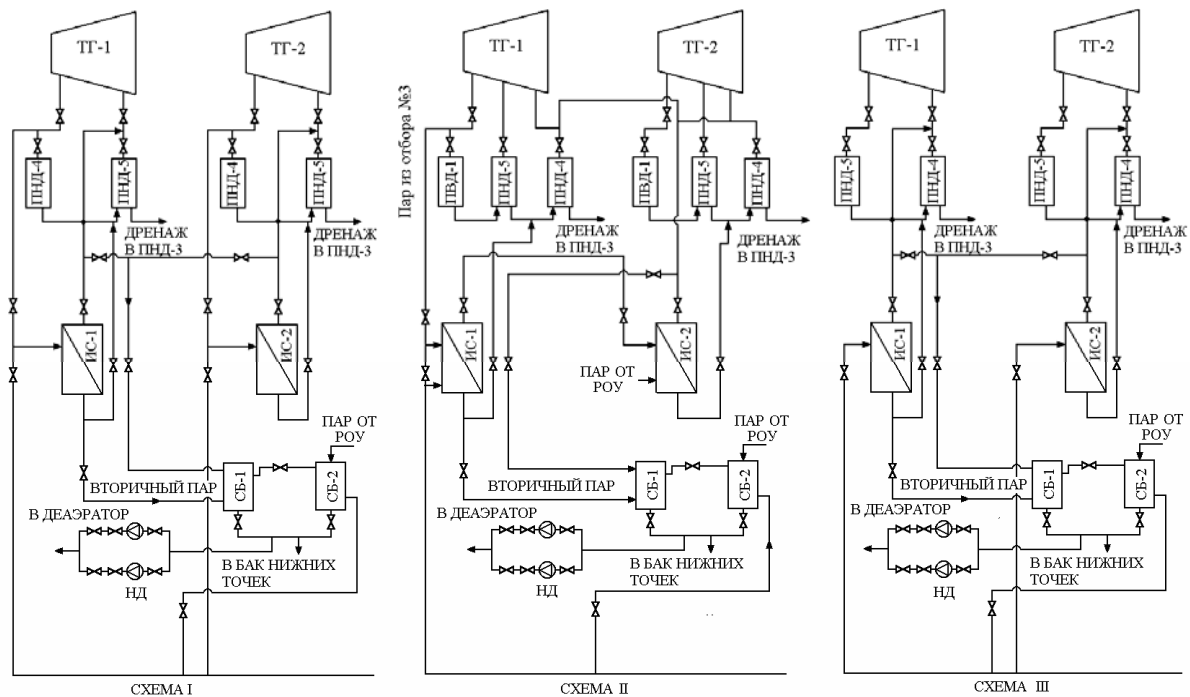


Рис. 20. Тепловые схемы подключения испарителей И-120 на Сахалинской ГРЭС:

I – действующая; II - с последовательным подключением испарителей; III – с подключением к РОУ; ТГ – турбоагрегат К-50 - 90; ПНД – подогреватель низкого давления; И – испаритель; СБ – сетевые бойлеры; НД – насосы дистиллята

В результате проведенных на Сахалинской ГРЭС испытаний установлено, что существующая тепловая схема включения испарителей (схема I на рис. 20) не обеспечивает требуемой производительности, так как нагрузка турбоагрегатов в режимах регулирования мощности энергосистемы постоянно изменяется в пределах от 15 до 40 МВт.

Опыт эксплуатации испарителей И-120 показал особенности работы ВПУ станции на низких нагрузках. При снижении мощности турбин и уменьшении давления греющего пара И-120 работают с пониженной производительностью по пару из-за недостаточной конденсирующей способности ПНД при низком расходе конденсата.

Расчет существующей схемы по специально разработанной программе для ПК показал, что производительности испарителей достаточно только при условии, если нагрузка турбоагрегатов не будет ниже 40 МВт (рис. 21). При повышении давления греющего пара до 0,6 МПа и переключении испарителей на питание от РОУ на пониженных нагрузках энергоблока наблюдается некоторое увеличение производительности. Рассмотрено и проанализировано несколько вариантов тепловой схемы включения испарителей, позволяющих повысить выработку вторичного пара (схемы II и III, рис. 20).

Из анализа опытных и расчетных данных следует, что эффективность применения вышеперечисленных схем будет зависеть от режима изменения мощности энергоблоков электростанции (рис. 21, 22). Установлено, что

оптимальным техническим решением является комбинирование рассмотренных схем подключения испарительной установки.

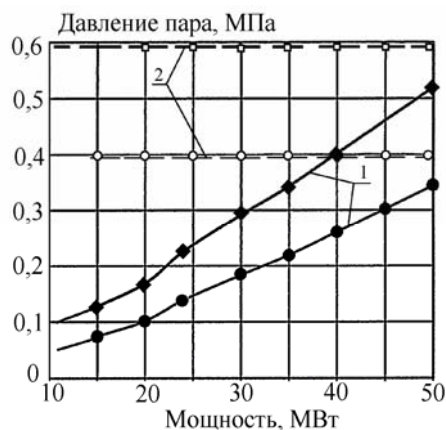
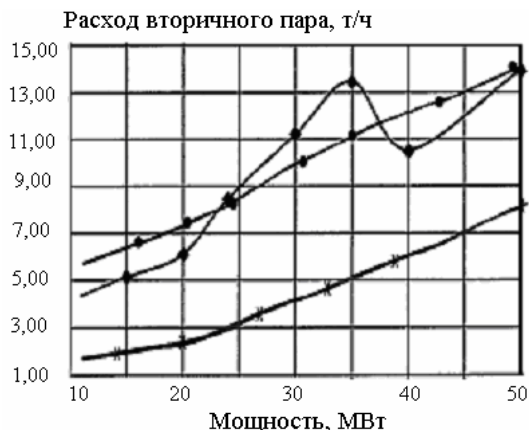


Рис. 21. Изменение расхода пара из испарителя при изменении мощности турбины: ---x--- действующая схема; ---◆--- отключение ПНД; ---●--- переключение испарителей на РОУ

Рис. 22. Изменение давления пара в испарителе от мощности турбины: 1 – в действующей схеме; 2 – при переключении испарителей на РОУ; ---- ■ ---- давление греющего пара; ----●---- давление вторичного пара

На Сахалинской ГРЭС с целью определения динамики генерации вторичного пара и уточнения параметров теплообмена в греющей секции при различных уровнях мощности произведены испытания испарителей И-120. Во время испытаний контролировались основные режимные характеристики работы И-120, включая параметры пара и питательной воды, качество вторичного пара и концентрата по содержанию. Результатами испытаний подтверждено, что работа испарителей И-120 существенно зависит от изменения мощности энергоблока (рис. 23). При резких колебаниях нагрузки в течение суток расход вторичного пара может изменяться в 1,5 – 2 раза, а качество пара по содержанию примесей натрия и кремниевой кислоты снижается в таких режимах сверх допустимых значений.

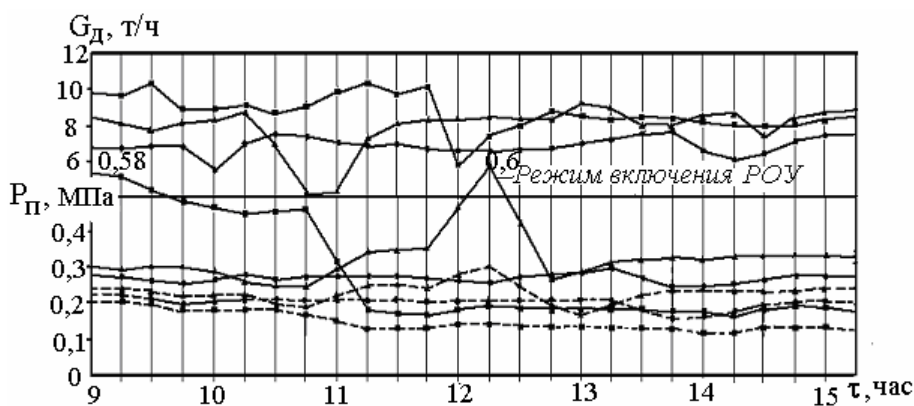


Рис. 23. Динамика расхода вторичного пара при изменении давления греющего пара и вторичного пара в испарителе И-120:

— греющий пар;
- - - -
- вторичный пар

Исследованиями установлено, что производительность испарителей на Сахалинской ГРЭС в значительной мере определяется не только параметрами греющего пара, но и теплосъемом при конденсации вторичного пара. Поэтому для повышения выработки вторичного пара рекомендовано перевести питание испарителей от РОУ на постоянный режим, даже в ущерб экономическим показателям ГРЭС. При модернизации испарительной установки целесообразно

подключить испарители к отборам турбин более высокого давления или к коллектору питания деаэраторов (на давление пара 0,6 МПа).

Предложено увеличить потребление вторичного пара из испарителей с выработкой дополнительного количества дистиллята, повысив подачу вторичного пара на агрегаты собственных нужд станции и теплофикационную установку, используя при необходимости известные схемы термокомпрессии вторичного пара.

В седьмой главе «Оценка возможностей гидромагнитной технологии в комбинированных схемах водоподготовки» исследуются гидромагнитные системы, применяемые для воздействия на теплоноситель с целью изменения его свойств и решения эксплуатационных задач, связанных с подготовкой воды на ТЭУ.

Эффект магнитной обработки оценивается стабилизирующим воздействием поля на состояние среды. В неустойчивых термодинамических системах стабилизирующее воздействие магнитного поля обеспечивает изменение параметров качества воды в технологических процессах водоподготовки в необходимую нам сторону.

Исследованиями установлено и подтверждено, что во всех случаях применения гидромагнитной технологии требуемый эффект зависит от сочетания параметров системы: напряженности магнитного поля, градиента напряженности в зазоре магнитного аппарата, скорости потока воды, длительности и кратности магнитного воздействия, температурного режима, концентрации и состава растворенных в обрабатываемой воде примесей.

Зависимость эффективности гидромагнитного метода от перечисленных факторов выражается как функция ряда переменных

$$K_M = f(H, \text{grad}H, V_B, C, P, T, \tau_M, L, h \dots),$$

где L, h – геометрические параметры аппарата, используемого в гидромагнитной системе.

Напряженность магнитного поля H и скорость протекания воды V_B через гидромагнитную систему выбраны главными параметрами для оценки данного метода. Установлено значение допустимой минимальной напряженности поля $H = 10000 - 16000$ А/м (рис. 24) и оптимальной скорости среды $V_B = 0,5 - 1,5$ м/с. Эти данные учтены при создании гидромагнитных аппаратов, номинальная производительность которых соответствует требуемым условиям обработки воды по скорости теплоносителя V_B .

Основные параметры гидромагнитной системы напрямую связаны с конструктивными характеристиками используемых гидромагнитных аппаратов (ГМА). Эта связь определена коэффициентом магнитной активации воды $K_M = B_3 V_B \tau_M = B_3 L$, где B_3 – среднее значение индукции в объеме воздействия магнитного поля системы, τ_M – время обработки воды в магнитном канале.

Статистическая обработка данных магнитных параметров действующих ГМА показала, что в униполярных модулях K_M не превышает величин 0,005 – 0,02 Тл·м, в многоконтурных биполярных модулях $K_M = 0,01 - 0,12$ Тл·м, а в

модулях объемной обработки он может достигать 0,5 – 1,0 Тл·м. В «идеальном» аппарате вся энергия магнитного поля используется на активацию водного потока $W_3 = B_3 H F_3 h/2$, где F_3 – площадь магнитного потока в зазоре. Тогда $K_M = 2 W_3 V_B / (H G_B)$. Полная энергия статического магнитного поля зависит от характеристик магнитной системы $W_M = B_M H_M v_M/2$, где v_M – объем магнитного материала. С учетом потерь коэффициент магнитной активации воды равен $K_M = 2 W_M v_M \eta_M / (H G_B)$.

На практике противонакипный эффект магнитной обработки нами рекомендовано определять по формуле $K_{MO} = (M_H - M_M) / M_H$, где M_H и M_M – масса накипи, образовавшаяся при равных условиях на поверхности нагрева при контакте с необработанной и обработанной магнитным полем водой. Величина K_{MO} зависит как от вышеперечисленных параметров, так и от конструкции гидромагнитного устройства и других эксплуатационных факторов. Установить прямую связь между K_M и K_{MO} затруднительно в силу многофакторности задачи, поэтому выбор основных параметров магнитной обработки осуществлялся в процессе разработки и наладки магнитных аппаратов.

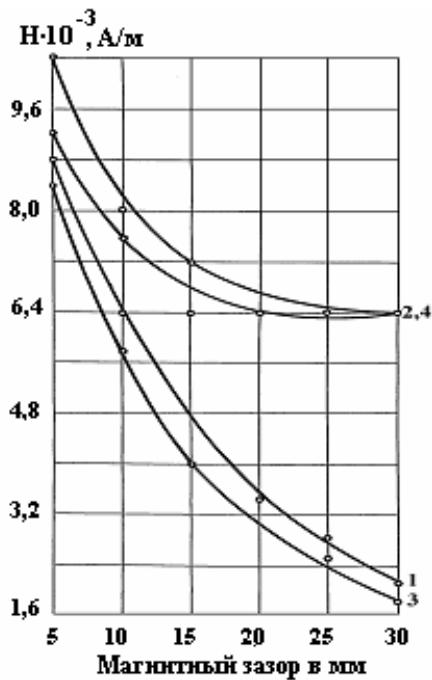
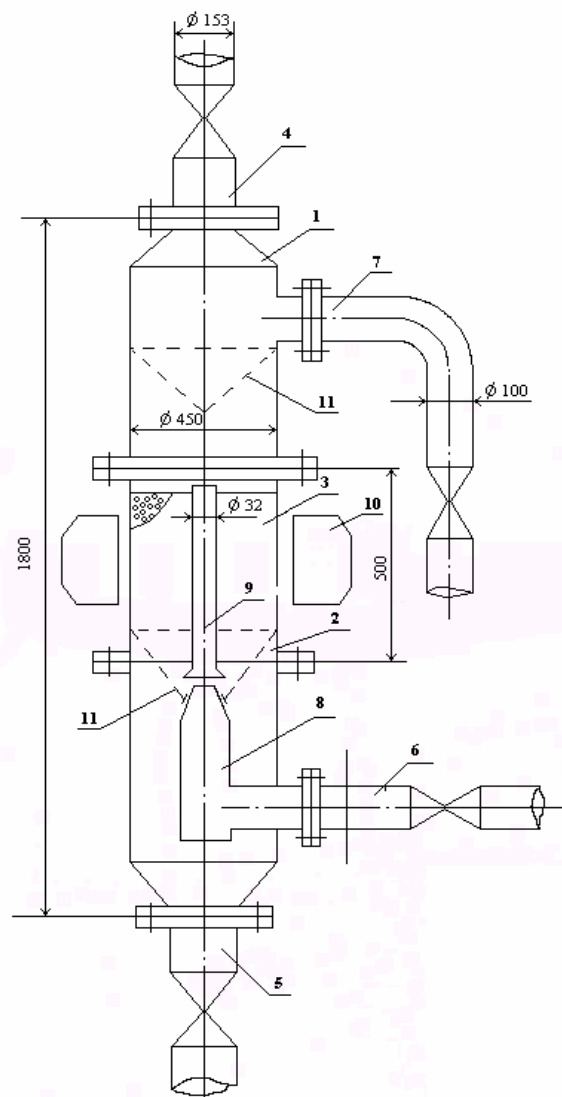


Рис. 24. Изменение напряженности магнитного поля в зазоре ГМА:

1, 3 – аппараты с кольцевым зазором; 2, 4 – аппараты канального и вихревого типа

Рис. 25. Схема гидромагнитного аппарата с шариковой засыпкой:

1 – корпус фильтра; 2 – зона засыпки; 3 – шариковая засыпка; 4 – подводящий патрубок; 5 – отводящий патрубок; 6 – патрубок подвода промывной воды; 7 – дренажный патрубок; 8 – струйный аппарат; 9 – направляющая трубка; 10 – электромагнитный узел; 11 – ограничивающие сетки



Установлено, что к наиболее перспективным гидромагнитным системам относятся ГМА с объемной обработкой воды в наведенном магнитном поле. Они не имеют ограничений по производительности при высокой напряженности магнитного поля. В работе предложена усовершенствованная конструкция ГМА объемного воздействия для всех типов ТЭУ (рис. 25). Она особенно эффективна, если исходная вода содержит значительное количество коллоидного железа. Кроме того, такие магнитные фильтры рекомендованы для ТЭС, имеющих проблемы по обеспечению качества турбинного и возвратного конденсата.

Испытания экспериментальной установки с гидромагнитной системой показали, что степень улавливания ферромагнитных частиц на ГМА объемного типа при больших концентрациях железа в исходном продукте составляет 90–95 %, а при малых концентрациях достигает 80 %. Размагничивание и промывка ГМА происходит в течение 5–10 минут, рабочая скорость фильтрования может достигать 800 – 1000 м/ч. Расход промывочной воды составляет 0,3 – 0,5 % нормальной производительности фильтра. Производительность разработанных моделей ГМА варьируется за счет изменения количества аппаратов, их геометрических размеров и гидродинамических параметров движения среды в диапазоне от 40 до 400 т/ч.

На основе выполненного исследования гидромагнитных систем предложена методика расчета параметров магнитного поля и гидродинамических характеристик аппаратов объемного воздействия с шариковой засыпкой.

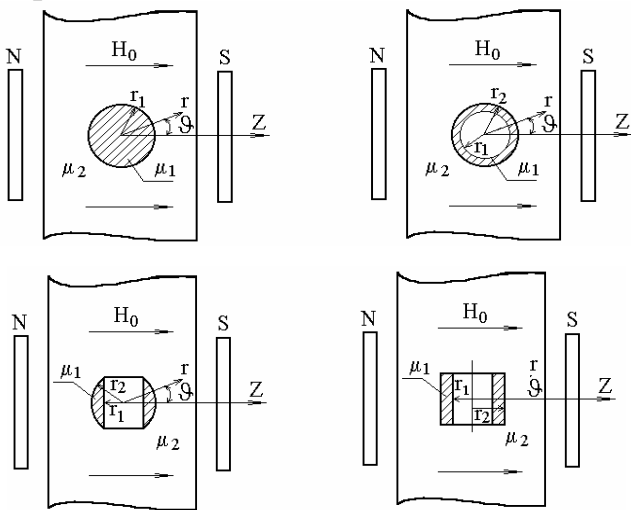


Рис. 26. Основные виды элементов засыпки ГМА

В первом приближении задача намагничивания шаров в засыпке ГМА решается для единичного объекта (рис. 26). Изучены изменения свойств магнитного поля фильтра в случае: а) применения цельнометаллических шаров; б) шаров из магнитопроницаемой среды с напыленным слоем ферромагнитного материала. Второй вариант более предпочтителен, так как позволяет экономить дорогостоящие конструкционные материалы.

Анализ уравнений магнитного поля

для системы постоянный магнит – шар показывает, что если величина $\mu_2 \gg \mu_1$ и это соответствует реальным условиям задачи (рис. 26), то при целом и полом шарах напряженность на границе шар – среда будет изменяться от $H_2 = 2H_0$ до $H_2 = 3H_0$ и, следовательно, напряженность поля будет значительно возрастать, причем этот вывод не зависит от толщины стенки сфероида.

Намагниченность полого шара зависит от толщины ферромагнитного слоя $\vec{M} = \frac{3\vec{m}}{4\pi(r_2^3 - r_1^3)}$, где $\vec{m} = \vec{H}_0 r_2^3$ – поле магнитного диполя, (при $\mu_1 \gg \mu_2$) и

намагниченность системы убывает с уменьшением толщины стенки полого шара. Установлено, что величина магнитной индукции на поверхности полого шара практически не изменяется. Только в случае формирования поверхности шара тонкой пленкой структура магнитного поля будет носить неопределенный характер, так как соотношение радиусов r_1/r_2 стремится к единице. Это доказывает возможность использования для засыпки в ГМА сфероидных или других объемных элементов (рис. 26, в, г) со слоем ферромагнитного материала при толщине его напыления не меньше 0,1 – 0,05 мм.

Гидравлическое сопротивление тракта, в котором устанавливается ГМА, не должно превышать 0,1 – 0,3 МПа, так как последовательно с гидромагнитным аппаратом в систему обработки воды включаются механические фильтры для улавливания коллоидных частиц и другое водоподготовительное и тепломеханическое оборудование. Сопротивление фильтрующего слоя шаровой засыпки определяется скоростью фильтрации, высотой слоя и размером шаров, диаметр которых может быть от 5 до 20 мм.

Общепринятую методику расчета гидравлического сопротивления механического фильтра в рассматриваемом случае применять нельзя, так как в механических фильтрах используются мелкозернистые материалы неупорядоченной структуры. Поэтому была рассмотрена гидродинамика потока при движении воды через упорядоченную структуру. Если заданы геометрические размеры ГМА, то сопротивление гидравлической системы составит величину $\Delta P = \frac{3N}{8} \Delta P_0$, где N – количество элементов в засыпке, ΔP_0 – сопротивление аппарата без шариковой засыпки.

Задача эффективной промывки ГМА и снижения допустимой скорости фильтрации при использовании цельнометаллических и полых шаров решена в исследуемом аппарате за счет применения в конструкции струйного узла, перемещающего шары засыпки в верхнюю часть корпуса, что способствует созданию "кипящего слоя".

В работе выполнен анализ схем подключения гидромагнитных аппаратов. Место установки ГМА, их количество и правильная организация движения теплоносителя имеют решающее значение при эксплуатации гидромагнитных систем. Это обусловлено особенностями гидромагнитной технологии (существующими ограничениями по расходу воды через ГМА, температуре нагрева среды и давлению, времени релаксации наведенных магнитным полем свойств и др).

С участием автора разработаны схемы установки ГМА для котельных с паровыми и водогрейными котлами, на ТЭЦ во втором теплофикационном контуре и в системах охлаждения конденсаторов турбин замкнутого типа (с градирнями).

На Артемовской ТЭЦ были исследованы экспериментальные установки для очистки конденсата от продуктов коррозии и снижения общего

солеосодержания с применением гидромагнитной технологии. Спроектированный узел для очистки турбинного конденсата включал два механических фильтра тонкой очистки с тремя предвключенными гидромагнитными фильтрами-флокуляторами или комбинацию ГМА с ионообменными фильтрами (рис 27 и 28).

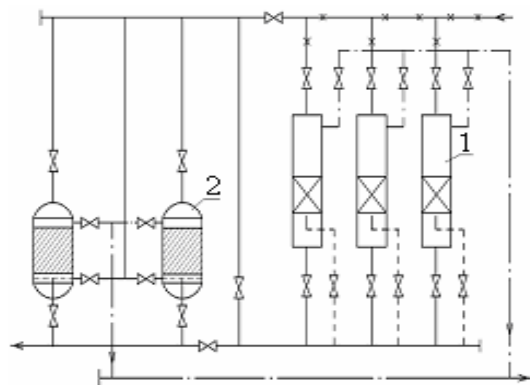


Рис 27. Схема очистки конденсата с механическими фильтрами и ГМА:
1 – ГМА; 2 – механический фильтр с засыпкой из цеолита; —х— конденсат после фильтров;
—х— конденсат до очистки;
----- промывочная вода; --- дренаж

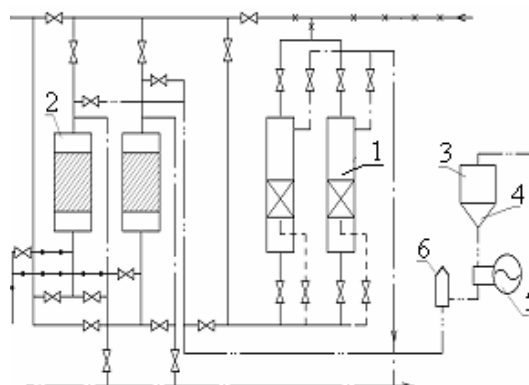


Рис 28. Схема очистки конденсата с ионообменными фильтрами и ГМА:
1 – ГМА; 2 – Н-катионитный фильтр; 3 – бак с регенеративным раствором; 4 – мерник; 5 – насос-дозатор; 6 – воздушник; —х— конденсат после фильтров;
—х— конденсат до очистки;
----- промывочная вода; --- дренаж;
---•--- раствор H₂SO₄; —•— сжатый воздух

Как показали результаты испытаний, в «малой» теплоэнергетике целесообразно применять ГМА на основе постоянных магнитов, как более надежные и долговечные устройства. Основные технические характеристики ГМА, применяемых на промышленно-отопительных котельных в Приморском крае в качестве дополнительного узла ВПУ: производительность - 0,5 ÷ 100 м³/ч, температурный режим - 10 ÷ 115°С, скорость потока - 0,5 ÷ 3,0 м/с, напряженность магнитного поля - до 1,6·10⁵ А/м. Более 80 образцов ГМА канального типа используются на промышленно-отопительных котельных предприятий Дальневосточного региона и получили положительную оценку эксплуатационного персонала.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями подтверждено, что внедрение гидромагнитной технологии позволяет существенно расширить разнообразие комбинированных схем водоподготовки, применяемых на ТЭУ.

В восьмой главе «Технико-экономическая эффективность обработки воды в энергетике» рассматривается изменение технико-экономических показателей промышленных установок, предназначенных для получения воды требуемого качества и оснащенных опреснительными или обессоливающим агрегатами.

В работе использован коэффициент экономической эффективности

$$\mathcal{E}_п = \frac{Ц_э W_э}{И}, \quad (11)$$

где I - издержки производства, C_3 - цена продукции, W_3 - количество отпускаемой энергии.

Для оценки технико-экономических показателей (ТЭП) применены технологические коэффициенты соотношения затрат на водоподготовку $\mathcal{E}_и = I_в/I$ и соотношения энергозатрат $\mathcal{E}_3 = W_в/W$.

Для аппаратов термического обессоливания, электродиализа и обратного осмоса принято, что основные производственные затраты связаны с расходом электрической и тепловой энергии. Тогда $I_в = C_3 W_в$ или $I_в = \mathcal{E}_3 C_3 W$. Рентабельность исследуемых комбинированных технологий водоподготовки достигается при уменьшении издержек на нее до величины отпускной стоимости энергии, расходуемой в технологическом процессе $I_в \leq C_3 W_в$.

При учете основных показателей ВПУ получено расчетное значение коэффициента эффективности

$$\mathcal{E}_п = (1 - \mathcal{E}_3) \mathcal{E}_и / \mathcal{E}_3. \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что величина отношения коэффициентов $\mathcal{E}_и/\mathcal{E}_3$ определяющим образом влияет на значение коэффициента $\mathcal{E}_п$, так как устанавливает его максимальное значение $\mathcal{E}_п^* = C_3 W/I_п$ при условии отсутствия затрат на подготовку воды, тогда соотношение

$$\mathcal{E}_п / \mathcal{E}_п^* = (1 - \mathcal{E}_3)(1 - \mathcal{E}_и). \quad (13)$$

Снижение коэффициентов \mathcal{E}_3 и $\mathcal{E}_и$ приводит к возрастанию величины $\mathcal{E}_п/\mathcal{E}_п^*$. При внедрении безреагентных технологий на ВПУ наблюдается увеличение расхода электрической или тепловой энергии на подготовку воды, однако это компенсируется уменьшением затрат на собственные нужды, на приобретение реагентов, материалов, обслуживание установок и т.д.

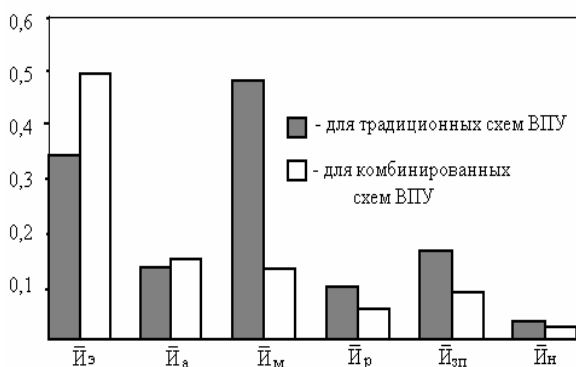


Рис. 29. Изменения структуры издержек производства при использовании комбинированных систем водоподготовки: $I_i = I_i/I_в$ (для ТЭС $I_r = I_3$)

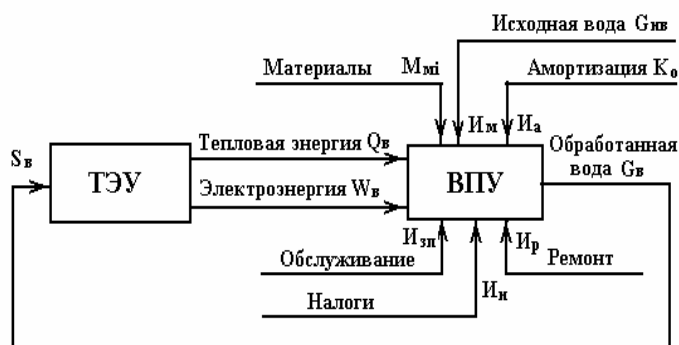


Рис. 30. Структурная схема формирования затрат на водоподготовку

При комбинировании традиционных и безреагентных технологий наблюдается снижение большей части издержек, за исключением топливной составляющей и амортизационных отчислений (рис 29 и 30).

Эксплуатационными данными подтверждено, что между \mathcal{E}_3 и $\mathcal{E}_и$ существует обратно пропорциональная зависимость вида $\mathcal{E}_и = (1 - k_3 \mathcal{E}_3^z)$. Значения эмпирических показателей k_3 и z характеризуют влияние повышения энергоемкости процесса на снижение остальных эксплуатационных издержек $k_3 = I_B / I_B^*$, $z = (I_B - I_B^*) / (I_3 \Delta W_B)$, где I_B и I_B^* - затраты на традиционную технологию водоподготовки и при применении комбинированной или безреагентной схемы обработки воды соответственно, ΔW_B - увеличение энергопотребления при применении комбинированной технологии.

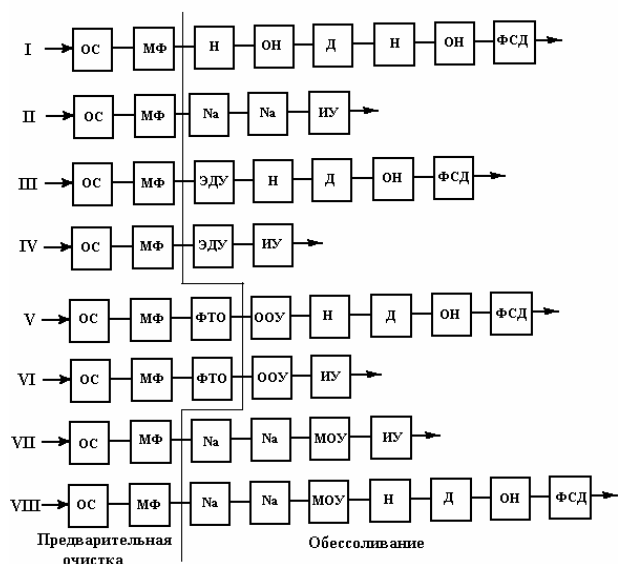


Рис. 31. Структура схем обработки воды

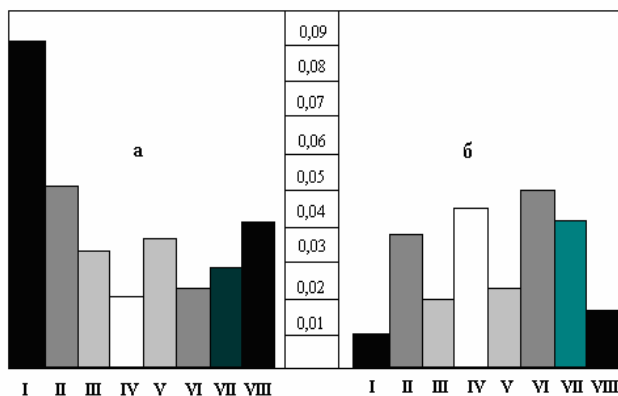


Рис. 32. Изменение коэффициента издержек $\mathcal{E}_и$ (а) и энергозатрат \mathcal{E}_3 (б) для рассматриваемых схем обработки воды

В качестве базовых при анализе ТЭУ выбрано восемь схем ВПУ (рис. 31). Расчетное соотношение показателей $\mathcal{E}_и$ и \mathcal{E}_3 для различных схем обессоливания приведено на рис. 32.

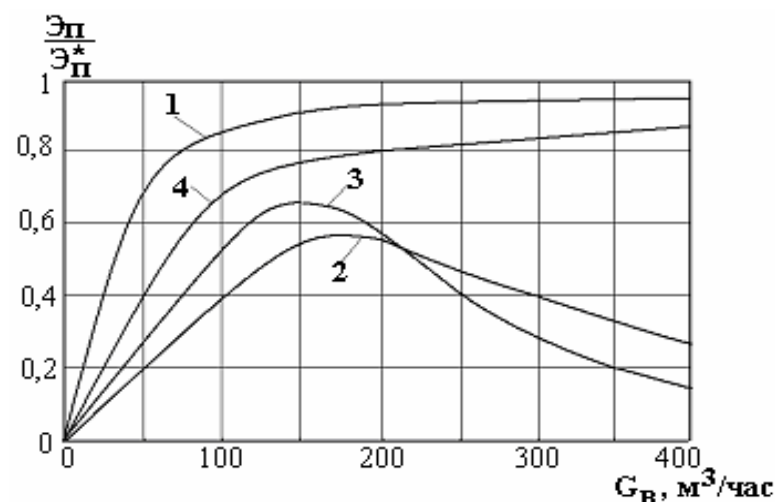


Рис. 33. Относительная величина критерия экономической эффективности:

1 - для схемы V; 2 - для схемы VI; 3- для схемы IV; 4 - для схемы III; ($\mathcal{E}_п^*$ - максимальное значение)

По предложенной методике определено соотношение $\mathcal{E}_п/\mathcal{E}_п^*$, учитывающее влияние важнейших факторов на ТЭП комбинированных систем ВПУ (рис. 33). Анализ ТЭП позволяет сделать вывод, что использование комбинированных схем водоподготовки, включающих мембранные системы и ионообменные фильтры, дает эффект, близкий к максимуму при производительности ВПУ, превышающей 50 т/ч. При комбинировании мембранных

систем обессоливания и испарителей из-за увеличения капиталовложений и повышения амортизационных издержек I_a суммарная прибыль снижается, а соотношение $\mathcal{E}_n/\mathcal{E}_n^*$ имеет максимум в диапазоне производительности ВПУ на ТЭС 150 - 200 т/ч дистиллята.

При расчете ТЭП водоподготовки для нахождения стоимости обработки воды применены зависимости $S_B = I_B/G_B$; $S_B^* = I_B/W_3$ или $S_B^* = I_B/(W - W_B)$. Установлено, что для мембранных систем капитальные и текущие затраты зависят от глубины обессоливания: $K_0 = K' \log (C_n/C_d)$ и $S_B = S'G_d \log (C_n/C_d)$, где базовые значения K' и S' – принимаются с учетом технологических и эксплуатационных особенностей данного типа обессоливающей установки.

Сравнение себестоимости обработки воды на ВПУ выполнено для электродиализной и обратноосмотической установок. За базовые эксплуатационные параметры приняты: для ЭДУ – рабочая плотность тока, для ООУ – рабочее давление на мембранах. В расчетах учтены расходы на потребление электроэнергии, амортизационные отчисления, на вспомогательные материалы, на комплектующие и воду для обеспечения собственных нужд. Из графиков (рис. 34) следует, что стоимость диллоата за ЭДУ существенно выше, чем пермиата за ООУ. При этом в обоих случаях имеется минимум функции S_B при значении плотности тока i_3 в ЭДА в диапазоне 55-60 A/m^2 и при давлении в обратноосмотических модулях на уровне 4 – 6 МПа, что соответствует теоретическим рекомендациям по оптимизации режимов работы мембранных установок. Минимум себестоимости наблюдается при максимальном значении критерия \mathcal{E}_n и соответствующих ему величинах производительности ЭДУ и ООУ (рис. 34).

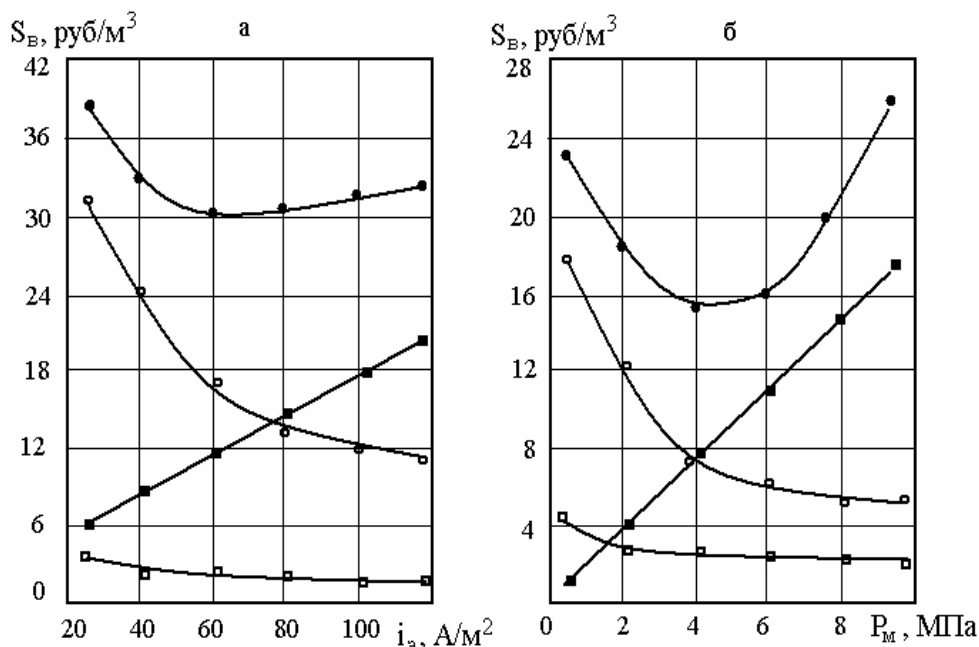


Рис. 34. Определение минимума себестоимости конечного продукта для ЭДУ (а) и ООУ(б) при изменении базовых технологических параметров установок: ● – суммарное значение; ■ - доля на энергозатраты; ○ – амортизационные отчисления; □ – расходы на материалы и собственные нужды

Достижимая глубина обессоливания принималась в расчетах как технологически оптимальная для соответствующего типа аппаратов. Для ЭДУ рассмотрены три ступени обессоливания, для ООУ – подключение модулей в две ступени. В комбинированных ВПУ себестоимость обработки значительно снижается, так как требования к обработанной воде после мембранных обессоливающих установок могут быть несколько ниже, в первую очередь по величине допустимого солесодержания. В соответствии с данными выполненного анализа себестоимость обессоленной воды, получаемой на ВПУ различного принципа действия, существенно отличается (рис. 35) и зависит от их производительности, с ростом которой она уменьшается. Прежде всего это положение подтверждается для установок термического обессоливания, для которых стоимость дистиллята достигает значений, не превышающих 18 – 20 руб/м³ при высоких производительностях установок.

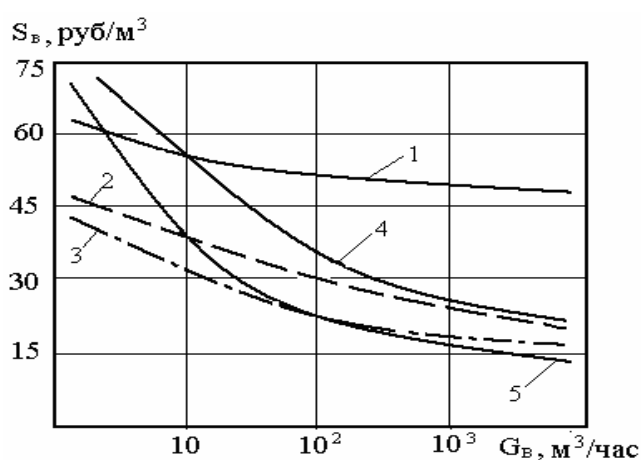


Рис. 35. Зависимость себестоимости обессоленной воды от производительности систем водоподготовки: 1 – по схеме I; 2 – по схеме III; 3 – по схеме V; 4 – по схеме II; 5 – по схеме VI

Для термических обессоливающих установок затраты тепловой энергии, определяющие эксплуатационную составляющую в себестоимости дистиллята, достигают 80 – 90% от общего объема издержек $I_{в}$. Это положение выдвигает дополнительные требования к оценке их экономической эффективности.

Совершенство процесса в ИУ с качественной точки зрения и его технико-экономическая эффективность более полно оценивается при помощи эксергетического КПД, определяемого по удельным расходам эксергии в процессе дистилляции

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{e_0}{d_{\text{ex}}} = 1 - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta e_i}{d_{\text{ex}}}, \quad (14)$$

где e_0 – использованная эксергия; Δe_i – потери эксергии в узлах установки; d_{ex} – удельный расход эксергии. Значения термодинамической характеристики – эксергетического КПД, хорошо согласуется со стоимостными показателями, что позволяет судить о технико-экономическом преимуществе ИУ различного типа. Эксергетический КПД связывает показатели энергетического источника,

На установках малой производительности получить такие значения $S_{в}$ весьма сложно и стоимость обессоленной воды составляет 35 - 40 руб/м³. При небольших расходах воды, вырабатываемой ВПУ для подпитки котлов на ТЭС и невысокой стоимости обессоленной воды, предпочтение следует отдать установкам обратного осмоса, технологическое и эксплуатационное совершенство которых весьма высоко.

обслуживаемого ИУ с ее собственной эффективностью, что особенно важно для испарителей, являющихся элементом тепловой схемы электростанции, пар из которых часто используется на внутристанционные технологические цели.

Связь между тепловыми и экономическими параметрами можно осуществить через $\mathcal{E}_{\text{ex}} = \eta_{\text{ex}} \sum_{i=1}^e \frac{S_{ei}e_i}{I_B}$ - коэффициент термо-экономического

совершенства ИУ. Этот показатель включает кроме η_{ex} интегральную стоимость подводимой к установке эксергии $S_{ei}e_i$ и эксплуатационные затраты I_B . Увеличение η_{ex} вызывает возрастание суммарных затрат. Поэтому эффективность установок термического обессоливания в большей степени оценивает величина \mathcal{E}_{ex} , значение которой изменяется от 0 до 1 (рис. 36).

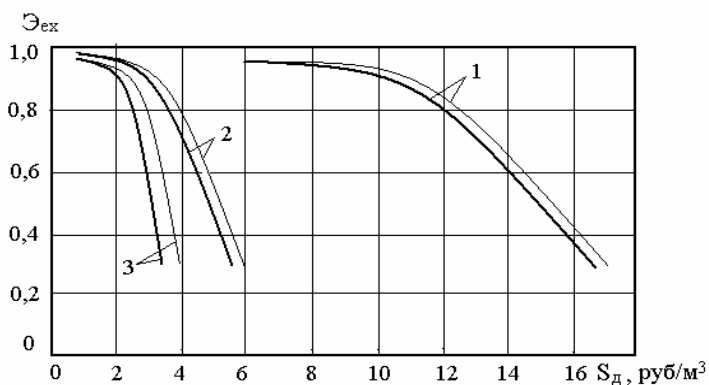


Рис. 36. Связь \mathcal{E}_{ex} с себестоимостью дистиллята в процессах термического обессоливания: 1 – испарители кипящего типа; 2 - ИУМВ; 3 – ТПИУ; — - без мембранных систем; — - с мембранными аппаратами в схеме ИУ

Термические установки при сравнении ТЭП проигрывают обратному осмосу и электро-диализу, но это не является определяющим фактором, так как ООУ или ЭДУ не обеспечивают максимально глубокого обессоливания, свойственного дистилляту испарителей. Кроме того, следует учитывать значительные расходы на предварительную очистку исходной воды на установках, оснащенных мембранными аппаратами.

Исследование подтверждено, что, при выборе типа ИУ для ТЭС

предпочтение следует отдавать системе водоподготовки, которая при заданной производительности и наилучшем качестве вырабатываемой воды имеет наименьший расход теплоты, максимальную относительную выработку дистиллята и минимальную его стоимость. Эти показатели в значительной степени зависят от источника теплоты, используемого при выработке дистиллята. Проведенные расчеты показывают, что при низком эксергетическом потенциале источника теплоты издержки на водоподготовку в ИУ значительно снижаются.

Таким образом, в теплоэнергетике стоимостной параметр дистиллята S_d имеет определяющее значение не только при выборе типа, конструкции и схемы подключения испарительной установки, но и для оптимизации условий ее эксплуатации.

Основные результаты и выводы: Итогом исследований по изучению, разработке и реализации в теплоэнергетике высокоэффективных и экологически безопасных технологий водоподготовки, а также современных систем и аппаратов для обработки воды на теплоэнергетических установках,

являются следующие результаты, определяющие научную новизну работы и ее практическую значимость:

1. Обосновано применение на ТЭС Дальневосточного региона мембранных установок в качестве ступени обессоливания воды перед фильтрами ионного обмена или для замены химической технологии умягчения питательной воды на котельных и в системах теплофикации.

2. Установлена связь между физическими и гидродинамическими параметрами электродиализных систем обессоливания; предложены эффективные методы предотвращения поляризации мембран ЭДУ при их эксплуатации; разработаны рекомендации по применению в теплоэнергетике ЭДУ на основе прямоточно-оборотных и каскадных схем движения рабочей среды; выполнено проектирование и проведены электрогидравлические испытания узлов опытной электродиализной установки, предназначенной для обессоливания воды в схеме ВПУ Артемовской ТЭЦ.

3. Теоретические зависимости, связывающие гидродинамические и электрические параметры процесса электродиализа подтверждены экспериментальными исследованиями кинетики обессоливания; в промышленных условиях исследован процесс реверсирования тока, выявлены нормативные режимы эксплуатации электродиализных аппаратов, предотвращающие развитие процесса концентрационной поляризации; установлено, что ЭДУ могут применяться на ТЭУ в комбинации с традиционными ионообменными методами при обработке воды с низким солесодержанием.

4. Установлены особенности использования технологии мембранного обратноосмотического обессоливания на ТЭУ и физические закономерности исследуемой технологии с учетом специфики вод Дальневосточного региона; определены уровень и структура энергетических связей между технологическими параметрами процесса обратного осмоса.

5. Установлены зависимости, позволяющие оценить изменение свойств мембран осмотических модулей в процессе длительной эксплуатации; произведена общая оценка гидравлических параметров модулей и схем ООУ и найдены границы их применения в качестве дополнительных узлов обессоливания; разработаны рекомендации по внедрению ООУ на базовых электростанциях Дальневосточного региона для обеспечения гибкого управления процессом обессоливания исходной воды.

6. Подтверждена эффективность применения на ТЭС испарителей с развитой системой регенерации для обработки теплоносителя с низкой температурой подогрева; доказано, что при этом появляются дополнительные экономические и экологические преимущества термических дистилляторов в сравнении с другими методами обработки воды на ТЭС; рассмотрена перспективная схема комбинированной обессоливающей установки на базе современных испарителей и ООУ.

7. Разработаны рекомендации по модернизации ВПУ с испарителями кипящего типа, обеспечивающие повышение производительности и качества вырабатываемого дистиллята.

8. Дана оценка эффективности применения гидромагнитных систем на электростанциях, промышленных и муниципальных котельных Дальневосточного региона; разработаны, изготовлены и проверены на практике в системах водоподготовки магнитные аппараты объемного типа с повышенной напряженностью поля и многозонной схемой воздействия; предложена методика для расчета и оптимизации параметров разработанных ГМА.

9. Произведена сравнительная оценка изменения экономических характеристик технологического процесса водоподготовки для комбинированных ВПУ, включающих мембранные системы обессоливания воды и подтверждена тенденция значительного снижения затрат на водоподготовку при их применении.

10. Для комбинированных систем водоподготовки выполнен термоэкономический анализ основных показателей, подтверждающий технологические возможности применения мембранных систем обессоливания в сочетании с испарителями различных видов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В. Слесаренко; Комбинированные системы водоподготовки для котельных с турбинами противодавления. - Промышленная энергетика. 2005, №6.- С. 24-27.

2. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Л.Е.Андреев, Л.А.Ставнийчук; Повышение надежности систем водоподготовки на Сахалинской ГРЭС. – Электрические станции. 2006. №1. – С. 14 -16.

3. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко. Применение испарительных установок для подготовки добавочной воды на Владивостокской ТЭЦ-2. - Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 1. – С. 7-9.

4. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, В.В.Васильев; Особенности применения гидромагнитных аппаратов в системах водоподготовки. - Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 5. – С. 21-25

5. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, В.Н.Слесаренко; Моделирование баромембранных процессов в установках обратного осмоса. - Транспортное дело в России. Специальный выпуск №3. 2005. - С. 144 - 146.

6. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Слесаренко В.Н; Влияние водоподготовки на технико-экономические показатели тепловых систем. - Транспортное дело в России. Специальный выпуск №3. 2005. – С. 40 – 43.

7. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.Н.Слесаренко, В.В.Слесаренко; Пути совершенствования водоподготовки для судовых энергетических установок. - Транспортное дело в России. Специальный выпуск №2. 2004. - С. 31 - 33.

8. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко; Водоподготовка и водно-химический режим энергетического оборудования. Учебное пособие. - Владивосток: изд-во ДВГТУ- 2003.- 185 с.

9. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.Н.Слесаренко, В.В.Слесаренко; Судовые опреснительные установки. - Владивосток: изд-во МГУ- 2001. – 488 с.

10. **Слесаренко В.В.** [Текст] / С.Д.Угрюмова, Ж.П.Павлова, В.В.Слесаренко; Теплообменные аппараты в примерах и задачах. Учебник. - Владивосток: изд-во ДВГАЭУ- 1996. – 150 с.

11. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко; Опреснительные установки с тепловыми насосами для Владивостокской ТЭЦ-2. Новейшие технологии в системе интеграционных процессов территорий стран АТР: Тез. докл. I международ. Инвест. конгресса.- Владивосток- 2000.- С 16 – 17.

12. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко В.В.Васильев; Обеспечение водно-химического режима теплофикационных сетей в Приморском крае. Новейшие технологии в системе интеграционных процессов территорий стран АТР: Тез. докл. I международ. Инвест. конгресса.- Владивосток - 2000.-С.17 - 18.

13. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Л.Е.Андреев; Водоподготовка на производственно-отопительных котельных. - Промышленная безопасность Приморья. №6. 2003. – С. 41- 47.

14. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Л.Е.Андреев; Модернизированные схемы современных деаэрационных установок. - Промышленная безопасность Приморья. № 8. 2003. – С. 45- 48.

15. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Л.Е.Андреев; Особенности водоподготовки на котельных. Труды ДВГТУ, вып.134. – Владивосток - 2002. – С.104-108.

16. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, В.В.Васильев; Обеспечение водно-химического режима энергетического оборудования котельных. Труды ДВГТУ, вып.134.- Владивосток, 2002. – С.108-111.

17. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Е.В.Козлов; Разработка схемы ВПУ с электродиализными аппаратами для Артемовской ТЭЦ. Труды ДВГТУ, вып. 134. – Владивосток - 2002. – С.111-114.

18. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.Н.Слесаренко, В.В.Слесаренко; Повышение эффективности опреснительных установок. В кн. Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта. - Владивосток: изд-во ДВГТУ - 2004. – С. 265 – 269.

19. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко; Расчет тепловой схемы производственной котельной. Методические указания - Владивосток: изд-во ДВГТУ - 2003. – 40 с.

20. **Слесаренко В.В.** [Текст]/ В.В.Слесаренко, С.Д.Угрюмова, И.Б. Слесаренко; Анализ систем очистки нефтесодержащих сточных вод. Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие Дальневосточных территорий: сб. трудов ТАНЭБ - Владивосток -1998.-С. 66-68.

21. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко; Установка для очистки стоков станции обезжелезивания поселка Лучегорск. Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие Дальневосточных территорий: сб. трудов ТАНЭБ - Владивосток - 1999. – С. 268-269.

22. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко; Сокращение агрессивных стоков из систем водоподготовки на ТЭС. Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие Дальневосточных территорий: сб. трудов ТАНЭБ – Владивосток - 2005. – С. 120 – 124.

23. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Е.В.Козлов; О реконструкции водоподготовительной установки Артемовской ТЭЦ. Вологдинские чтения.

Естественные науки: матер. регион. НТК - Владивосток: изд-во ДВГТУ – 1998. - С. 23-25.

24. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Е.В.Козлов, В.В.Васильев; Разработка аппаратно-технологической схемы установки конденсатоочистки Артемовской ТЭЦ. Вологдинские чтения. Естественные науки: матер. регион. НТК- Владивосток: изд-во ДВГТУ - 1998. – С.36-38.

25. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Е.В.Козлов; Особенности применения мембранных технологий для обессоливания воды на ТЭС. Вологдинские чтения. Естественные науки: матер. регион. НТК - Владивосток: изд-во ДВГТУ - 2003. – С. 28-30.

26. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, Е.В.Козлов, Л.Е.Андреев; Применение электродиализных синтезаторов для восстановления регенеративных растворов ионообменной части ВПУ. Вологдинские чтения. Естественные науки: матер. регион. НТК - Владивосток: изд-во ДВГТУ - 2004.- С. 18-21.

27. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко, В.В.Васильев. Комбинированные системы водоподготовки для теплофикационных котельных и тепловых сетей. Вологдинские чтения. Естественные науки: матер. регион. НТК - Владивосток: изд-во ДВГТУ - 2004. – С. 21-24.

28. **Слесаренко В.В.** [Текст] / В.В.Слесаренко; Возможности применения испарительных установок для подготовки воды на Владивостокской ТЭЦ-2. Вологдинские чтения. Естественные науки: матер. регион. НТК - Владивосток: изд-во ДВГТУ - 2004. - С. 24-28.

29. **Slesarenko V.V.** Peculiarities of boiling seawater in distillation plants / V.N.Slesarenko, V.V.Slesarenko; Desalination – 1996 - № 108. - P. 105-109.

30. **Slesarenko V.V.** Hydrodynamic and heat transfer in apparatuses desalting of sea water / V.N.Slesarenko, V.V.Slesarenko; Proceedings IDA world congress on desalination and water resurse. - 1997- Vol.1.- P. 261-270.

31. **Slesarenko V.V.** Desalination plant with absorption heat pump for power station / V.V.Slesarenko; Desalination – 1999- № 126.- P. 281- 285.

32. **Slesarenko V.V.** Heat Pumps as source of heat energy for desalination of sea water / V.V.Slesarenko; Desalination – 2001 - № 139. - P.405-410.

33. **Slesarenko V.V.** Electrodialysis membrane plants in water conditioning schemes at thermal power stations / V.V.Slesarenko; J. of China ICC. The 2nd International Conference on Application of Membrane Technology. Beijing, 2002.

34. **Slesarenko V.V.** Thermodynamics of desalination system at the nuclear power stations / V.V.Slesarenko; Int. J. of Nuclear Desalination – 2003 -Vol. 1. № 1.

35. **Slesarenko V.V.** Electrodialysis and reverse osmosis membrane plants at the power stations / V.V.Slesarenko; Desalination – 2003- № 158.- P.303-311.

36. **Slesarenko V.V.** Thermal and membrane systems for combined desalination plants / V.V.Slesarenko; Desalination – 2005- № 182. – P.495-502.

37. **Slesarenko V.V.** Influence of water treatment systems on profitability of thermal power stations / V.V.Slesarenko, V.N.Slesarenko; Proceedings the Second International Exergy, Energy and Environment Symposium. (IEEES2) Kos, Greece. July 3 – 7, 2005.

Личный вклад в статьях, опубликованных в соавторстве, составляет не менее 50%. Отдельные вопросы диссертации рассмотрены в пятнадцати отчетах по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам.

Слесаренко Вячеслав Владимирович

Совершенствование систем водоподготовки для теплоэнергетических установок с применением мембранных технологий
(на примере Дальневосточного региона)

Автореферат

Факс 8-4232-260727. E-mail: vslesarenkov@ramblerl.ru

Подписано в печать 30.01.2006 г. с оригинал-макета
Усл. печ. л. 2,8. Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № .

Типография издательства ДВГТУ, Владивосток, ул. Пушкинская д. 10.