

---

*На правах рукописи*



ЖАДАН Александр Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ  
ВОДЫ НА ТЭС НА БАЗЕ ИОННОГО ОБМЕНА  
И МЕМБРАННЫХ МЕТОДОВ**

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

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

Иваново 2013

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

Научный руководитель:

**Бушуев Евгений Николаевич**, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Очков Валерий Федорович**, доктор технических наук, профессор, национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», профессор кафедры «Технологии воды и топлива»

**Шатова Ирина Анатольевна**, кандидат технических наук, муниципальное предприятие «Ивгортеплоэнерго», начальник службы контроля и диагностики тепловых энергоустановок

Ведущая организация: **ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт»**, г. Москва

Защита состоится «24» декабря 2013 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус "Б", аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01. E-mail: uch\_sovet@ispu.ru

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

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
Д 212.064.01,  
доктор технических наук, профессор



Шувалов  
Сергей Ильич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Современное состояние тепловых электрических станций (ТЭС) характеризуется строительством и вводом в действие новых энергоблоков в рамках стратегической программы развития электроэнергетики России до 2020 года. Так в 2011 году введено около 50-ти новых энергетических объектов, примерно столько же введено и в 2012 году. Для восполнения потерь водного теплоносителя на новых и действующих ТЭС, как правило, вводятся новые водоподготовительные установки (ВПУ) на базе перспективных технологий и нового оборудования. Исходные, природные воды России, особенно центральных и северных областей, характеризуются повышенным (иногда очень высоким) содержанием органических веществ и соединений железа, что оказывает негативное влияние на работу таких аппаратов, как установки обратного осмоса, электродеионизационные установки, широко рекомендуемые для эксплуатации на российских ТЭС. Учитывая, что большая часть вновь вводимых энергоблоков базируется на парогазовых установках (ПГУ), требующих повышенной степени очистки добавочной воды, необходимо разработать технические регламенты по выбору схем водоподготовки и эффективному использованию новых аппаратов. Для этого следует провести широкомасштабные исследования, как на лабораторных стендах, так и на пилотных полупромышленных установках непосредственно в условиях конкретных ТЭС.

В данной работе приводятся результаты исследований перспективных схем и аппаратов водоподготовки на всех стадиях очистки природной воды: предварительная очистка (осветление), частичная деминерализация, умягчение и глубокое обессоливание на ионитах и аппаратах мембранной обработки. Основное внимание уделено исследованию новых для российских ТЭС мембранных технологий обессоливания воды.

**Соответствие паспорту специальности.** Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности* – «проблемы совершенствования действующих и обоснование новых ... систем водоподготовки»; *в части области исследования* – пункту 3: «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий ... водных и химических режимов, способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду»; пункту 4: «Разработка конструкций ... вспомогательного оборудования ... их проектирования и диагностирования»; пункту 6: «Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования тепловых электростанций».

**Целью работы** является ресурсосбережение и повышение экологической безопасности вновь вводимого и реконструируемого водоподготовительного оборудования, путем разработки и внедрения перспективных схем, технологий и оборудования обессоливающих водоподготовительных установок добавочной воды энергоблоков ТЭС.

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

1. Совершенствование технологии противоточного ионирования воды с разработкой новых технологических и конструктивных решений.

2. Исследование эффективности работы известных фильтрующих элементов мембранной технологии обработки воды (ультрафильтрация, обратный осмос) в различных схемных и режимных условиях на природных водах с повышенным содержанием органических веществ.

3. Разработка новых перспективных технологических схем обессоливания воды на ТЭС, содержащих установки мембранной технологии.

4. Промышленная проверка предлагаемых технологических решений на энергетических предприятиях России.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** обеспечивается использованием классической теории очистки воды от коллоидных и истинно-растворенных примесей, апробированных в теплоэнергетике методик анализа качества водного теплоносителя; совпадением полученных результатов с результатами исследований других авторов. Промышленному внедрению схем и аппаратов водоподготовки предшествовали обширные лабораторные исследования и испытания на пилотных промышленных установках на конкретных теплоэнергетических предприятиях.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Определены температурные и расходные зависимости, характеризующие формирование плотного слоя ионита в восходящем водном потоке противоточного фильтра, на основе которых разработаны и испытаны новые схемные решения с рециркуляцией части обессоленной воды, новые конструктивные решения, позволяющие повысить эффективность использования ионитов и уменьшить расходы воды на собственные нужды.

2. Исследована эффективность работы и получены новые результаты обработки природных вод с повышенным содержанием органических примесей на элементах и установках мембранной технологии очистки в зависимости от качества и температуры поступающей воды, схемных решений и типа фильтрующих мембран.

3. Разработаны и испытаны ресурсосберегающие схемы комбинированной обработки природных вод с использованием мембранных технологий очистки, характеризующиеся высокими экологическими показателями.

**Практическая значимость работы.** Результаты исследований реализованы в виде технических, конструктивных решений и внедрены в проектирование, монтаж и эксплуатацию водоподготовительных установок более чем на десяти ТЭС России, таких как ТЭЦ-11 Иркутскэнерго, ТЭЦ-20 Мосэнерго, Шатурская и Новочеркасская ГРЭС, Ноябрьская и Краснодарская ТЭЦ, Центральная котельная г. Астрахань, Медногорский

Медносерный комбинат и др. в рамках технологической деятельности ЗАО «НПК Медиана-фильтр» и других компаний. Результаты работы могут использоваться для решения широкого класса задач по очистке природных и технологических вод ТЭС, при проектировании новых ВПУ, использующих мембранные технологии очистки. Разработана методика технико-экономической оценки технологических схем разной структуры, содержащих аппараты мембранной технологии.

**Автор защищает:**

1. Результаты исследований по совершенствованию технологии ионообменной обработки воды, включая температурные зависимости минимальной скорости восходящего потока воды в противоточном фильтре, схемные и конструктивные решения, направленные на повышение эффективности очистки воды и уменьшение расхода воды собственные нужды.

2. Результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний мембранных технологий обработки воды: ультрафильтрации и обратного осмоса.

3. Новые технологические схемы глубокого обессоливания воды на ТЭС: комбинированную схему и схему интегрированной мембранной технологии.

4. Частные решения по совершенствованию аппаратов и схем обработки воды на ТЭС.

**Личный вклад автора** состоит в разработке методики исследования; лабораторных стендов и пилотных установок для проведения промышленных испытаний и схем новых технологий, аппаратов обработки воды, а также участия в разработке, испытании и внедрении новых конструкторских и схемных решений по ионному обмену и мембранным технологиям; проведении анализа результатов технико-экономических расчетов по сопоставлению разных схем обработки воды.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы обсуждались на следующих конференциях: V, VI, VII всероссийских научно-практических конференциях «Повышение эффективности энергетического оборудования» (г. Иваново, Санкт-Петербург, 2010, 2011, 2012 гг.), 3, 4, 5 международном водно-химическом форуме (г. Москва, МЭИ, 2010, 2011, 2012 гг.), VII международной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, КГЭУ, 2012 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Мембраны 2010» (г. Москва, 2010 г.), IV Международной научно-технической конференции «Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи» (г. Москва, 2013 г.), I, II Международных Белорусских водно-химических форумах (г. Минск, 2010, 2012 гг.), научно-технических советах ЗАО «НПК Медиана-фильтр» (г. Москва, 2008–2013 гг.), а также на научно-методическом семинаре кафедры ХХТЭ ИГЭУ (г. Иваново, 2013 г.).

**Публикации.** Материалы диссертации нашли отражение в 21 опубликованной работе, в том числе в семи статьях в ведущих рецензируемых журналах (по списку ВАК РФ); получен патент на полезную модель.

**Содержание и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, библиографического списка из 122 наименований и приложений. Объем диссертации, включая приложения, составляет 193 страницы машинописного текста. Работа содержит в основном тексте диссертации 72 рисунка и 33 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены ее цель и задачи, указана научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан анализ современного состояния водоподготовки и приведены перспективные аппараты и технологии водоподготовки на ТЭС. Традиционные технологии химического и термического обессоливания морально устарели, связаны с большим расходом реагентов, что приводит к необходимости использования сложного реагентного хозяйства, включая нейтрализацию стоков, и характеризуются высокими капитальными и эксплуатационными затратами. При их эксплуатации образуются большие объемы высокоминерализованных сточных вод.

В настоящее время проводится широкая реконструкция существующих ВПУ и строительство новых. При этом все чаще вводятся в эксплуатацию энергоблоки с парогазовыми установками, для которых по сравнению с паросиловыми энергоблоками, введены жесткие требования к содержанию органических веществ по показателю «общий органический углерод». При использовании традиционных технологий обессоливания этот показатель в обессоленной воде может находиться в пределах от 100 до 800 мкгС/л, что не отвечает современным требованиям. Даже применение ионитов-органопоглотителей часто не приводит к достижению требуемых показателей, но увеличивает расход воды на собственные нужды и потребление поваренной соли и щёлочи на регенерацию.

Одним из основных направлений по совершенствованию технологии ионного обмена является применение противоточных технологий. Применение противоточных схем обессоливания позволяет значительно уменьшить расход реагентов на регенерацию, количество образующихся сточных вод, снизить количество ступеней обработки и необходимого оборудования.

Технологии усовершенствованного термического обессоливания, по сравнению с традиционной технологией, решают ряд проблем экологического характера, однако оказываются мало эффективны для природных вод малой минерализации ( $[SO_4^{2-}] + [Cl^-] < 3$  мг-экв/л), характерной для

большинства вод центра и севера России, как показано в диссертационной работе Юрчевского Е.Б. (рис. 1). Кроме того, нарушение температурного или солевого режима таких установок может привести к нарушению водно-химического режима питательного тракта.

Большинство вновь вводимых энергоблоков на ТЭС комплектуются установками обработки воды, содержащими аппараты мембранной технологии (установки обратного осмоса, ультрафильтрации, электродеионизации).

В настоящее время, значительная часть установок, использующих мембранные технологии, комплектуется из зарубежных фильтрующих элементов. Основные преимущества таких установок заключаются в сокращении расхода реагентов на восстановление (регенерацию) мембраны, в уменьшении габаритов оборудования, снижении площадей складских помещений. Широкому внедрению их в производство мешает отсутствие нормативной базы на их использование и противоречивый опыт эксплуатации головных установок на отечественных ТЭС, особенно для вод с повышенным содержанием органических веществ.

В настоящее время наиболее перспективными технологиями деминерализации воды на ТЭС для вод с небольшой минерализацией ( $\Sigma An = [SO_4^{2-}] + [Cl] < 3$  мг-экв/л – воды центра и севера России) является химическое обессоливание на базе противоточных фильтров, а для вод средней и высокой минерализации – схемы на базе мембранных методов.

Совершенствованию схем обессоливания воды на ТЭС посвящены многочисленные исследования, выполненные сотрудниками: МЭИ (Седлов А.С. и др.), ВНИПИЭнергопром (Шищенко В.В. и др.), ВНИИАМ (Юрчевский Е.Б. и др.), ИГЭУ (Ларин Б.М. и др.).

Во **второй главе** приведено описание лабораторных и стендовых опытных установок для исследования режимов и технологий очистки природной воды: коагуляции и осветления, удаления взвешенных и коллоидных примесей на ультрафильтрационных мембранах, деминерализации



Рис. 1. Зависимость основных эксплуатационных затрат на обессоливание воды для ионообменной (1 – цены г. Москвы, 2 – цены Запада), обратноосмотической (3) и термической (4) технологии от содержания анионов сильных кислот в исходной воде

ции воды на обратноосмотических мембранах и модулях и противоточного ионирования.

Разработанные опытные установки отвечают отдельным стадиям



Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки ионитного фильтра

обработки природных вод и моделируют промышленные аппараты, например, как показано на рис. 2, что обеспечивает возможность исследований новых технологий водоподготовки и оценки границ их эффективного использования, в том числе, на маломинерализованных водах с повышенным содержанием органических примесей, в том числе непосредственно на ВПУ ТЭС.

Расчёт технологических параметров систем водоподготовки выполнялся с помощью специализированных программ, предоставляемых производителями основных технологических элементов схем водоподготовки («CADIX», «X-Calc», «ROSA», «IP-PRO» и др.).

Методика расчета технико-экономических показателей разработана автором и является основной методикой оценки схем ВПУ предприятия ЗАО «НПК Медиана-фильтр». Расчетная методика реализована в среде Microsoft Excel.

В **третьей главе** представлены результаты лабораторных испытаний и исследования эффективности схемных решений противоточной ионообменной технологии.

Технология противотока может быть реализована несколькими способами, основным из которых является технология Schwebbett, при которой вода фильтруется в восходящем потоке. Однако, при значительных изменениях производительности установки это может вызвать негативные явления, например, перемешивание слоев ионита и нарушение эффекта послойной сорбции-десорбции, являющегося основой глубокой очистки воды.

На примере катионита марки Lewatit MonoPlus S100 показана опытная зависимость минимальной скорости восходящего потока воды от ее температуры (рис. 3), необходимой для поджатия ионита.

Представленную на рис. 3 зависимость можно описать эмпирической формулой:

$$w_{\min} = \frac{1}{0,000027t^2 - 0,00351t + 0,15979}, \quad (1)$$

где  $w_{\min}$  – минимальная скорость восходящего потока, м/ч;  $t$  – температура обрабатываемой воды, °С.

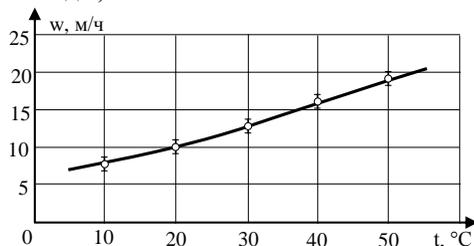


Рис. 3. Зависимость минимально необходимой скорости восходящего потока воды от температуры для поджатия слоя катионита Lewatit MonoPlus S100

При эксплуатации ВПУ производительность может меняться, что связано с остановом части теплоэнергетического оборудования, изменением отпуска производственного пара потребителю и т.д., все это ведет к проблеме обеспечения минимального расхода обрабатываемой воды через противоточные фильтры. Возникает значительное снижение скорости восходящего потока и появляется угроза недопустимого перемешивания слоев ионита. Выражение (1) позволяет оценить минимальную скорость, а затем расход при различных температурах обрабатываемой воды. С целью обеспечения минимального расхода предложено несколько технических решений по рециркуляции части потока фильтрата после анионитного фильтра в начало обессоливающей установки с использованием тех или иных промежуточных баков и насосов (рис. 4). Автор впервые разработал и внедрил такое технологическое решение на ВПУ ТЭЦ-11 ОАО «Иркутскэнерго» в Усолье-Сибирском.

Другим способом противоточного ионирования является технология UPCORE. Одним из существенных недостатков этой технологии является необходимость в увеличенном диаметре трубопроводов подачи воды на зажатие ионита при регенерации и отвода регенерационных стоков. Расчёт насосов собственных нужд на максимальный расход при зажатии слоя загрузки приводит к увеличению капитальных затрат на насосную станцию и эксплуатационных расходов за счёт увеличения потребления электроэнергии. Такое увеличение расхода электроэнергии становится весьма заметным при наличии нескольких рабочих линий с коротким фильтроциклом.

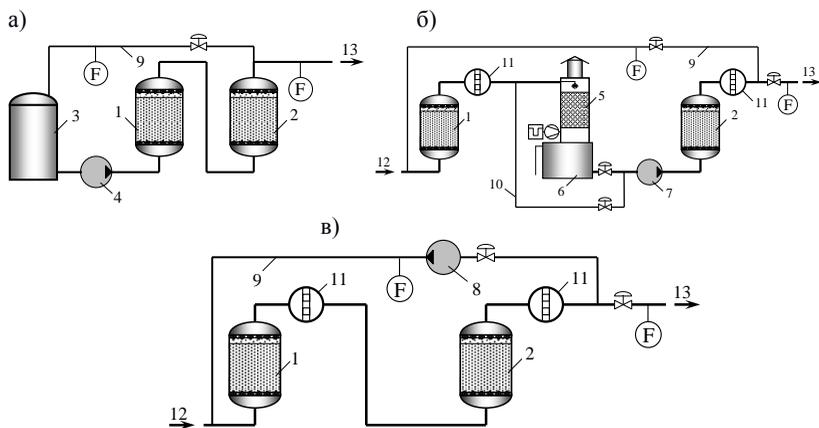


Рис. 4. Принципиальные схемы технологии Schwebebett с рециркуляцией части обессоленной воды:

а) при использовании бака и насоса осветленной воды; б) при использовании бака декарбонизированной воды; в) при отсутствии баков и насосов в схеме; 1 – противоточный Н-катионированный фильтр; 2 – противоточный ОН-анионитный фильтр; 3 – бак осветленной воды; 4 – насос осветленной воды; 5 – декарбонизатор; 6 – бак декарбонизированной воды; 7 – насос декарбонизированной воды; 8 – насос рециркуляции; 9 – линия рециркуляции воды; 10 – байпасная линия; 11 – ловушка ионитов; 12 – осветленная вода; 13 – обессоленная вода

Автором предложены схемы, согласно которым, ионитные фильтры оборудуются байпасной линией в обход коллектора, что позволяет проводить отмывку в замкнутом контуре. Вода для зажатия слоя подаётся из коллектора подготовленной воды в обход ловушек смолы. Такое решение позволяет эффективно избавиться от «лишних» трубопроводов и уменьшить расход воды на собственные нужды. Настоящее решение успешно реализовано и применяется на ВПУ ТЭЦ-20 Мосэнерго.

Предложенные схемные решения с рециркуляцией части обрабатываемой воды обеспечивают расширение рабочего диапазона производительности и устойчивую эксплуатацию обессоливающей установки на основе противоточных ионитных фильтров.

С участием автора разработан новый метод регенерации «Грави-Софт» для установок умягчения воды. Предлагаемая технология ближе всего к противоточной технологии UPCORE. Отличительными особенностями являются отсутствие при регенерации стадии зажатия слоя ионита. При пропуске регенерационного раствора в восходящем потоке скорость регенерационного раствора поддерживается минимальной, равной

0,1–3 м/ч, чтобы ионит оставался зафиксированным в нижней части фильтра, что предотвращает смешение слоев ионита.

После пропуска необходимого количества регенерационного раствора осуществляется промывка по линии регенерации. В предлагаемой технологии регенерации скорость восходящего потока находится в пределах 15–25 м/ч, что достаточно для поднятия всей загрузки ионита в компактном состоянии и прижатии её к слою инертного материала. Остальные операции по регенерации (осаждение ионита и окончательная промывка) проводятся аналогично как при технологии UPCORE.

Предложенная технология «ГравиСофт» реализована на Учалинском ГОКе и на Медногорском Медносерном комбинате. Опыт эксплуатации показал, что по сравнению с технологией UPCORE при равном объеме ионита и одинаковом фильтроцикле расход соли на регенерацию уменьшается на 10 %, а расход воды на собственные нужды – на 15 %.

В **четвертой главе** представлены результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний по изучению возможности применения мембранных технологий в схемах очистки природных вод: осветления, деминерализации, удаления органики в условиях повышенного содержания органических примесей и относительно невысокой минерализации, а также влияния технологических и режимных факторов на работу ВПУ на базе этих технологий.

Имеющийся опыт эксплуатации установки обратного осмоса (УОО) свидетельствует о том, что основным фактором, от которого зависит удовлетворительная работа мембран, является соблюдение норм качества воды, подаваемой на эту установку. Анализ требований производителей показывает, что практически нет ограничений по концентрации солей, содержащихся в поверхностных водоисточниках, возможна работа установки в широком диапазоне показателя рН. Ограничивается лишь содержание тех веществ, которые могут привести к отравлению или забиванию мембран. Фирмы-производители обратноосмотических элементов оценивают качество обрабатываемой воды преимущественно коллоидным показателем SDI. Предельно допустимое SDI – 5, а при значениях SDI от 3 до 5 производители относят такие воды к проблемным, устойчивая работа обратноосмотического элемента гарантируется при SDI < 3, то есть при малом содержании коллоидных примесей.

Перспективным вариантом снижения индекса SDI в обрабатываемой воде является предварительная обработка исходной (природной) воды на установке ультрафильтрации (УУФ).

При участии автора на ТЭЦ-20 Мосэнерго были проведены лабораторные испытания УУФ, как предвключенной перед установкой обратного осмоса. Некоторые результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты лабораторных исследований УУФ

№ п/п	Водный поток	pH	Щ <sub>о</sub> , мг-экв/л	С <sub>Fe</sub> , мкг/л	Ок, мгО/л	С <sub>Al</sub> , мкг/л	SDI
1.	Исходная вода	8,70	3,15	269	6,08	8	–
2.	Фильтрат УУФ (без коагуляции)	8,49	3,05	236	6,24	7	>6,67
3.	Фильтрат УУФ (D <sub>к</sub> =7 мгAl/л; τ=15 мин)	7,26	2,60	73	4,48	48	2,2
4.	Фильтрат УУФ (D <sub>к</sub> =8 мгAl/л; τ=5 мин)	7,75	2,50	84	4,32	152	–

Из табл. 1 видно, что без использования коагулянта (проба №2) снижение содержания органических веществ и соединений железа не велико, получаемый фильтрат не соответствует требованиям к поступающей воде на УОО.

Таким образом, для эффективного использования УУФ в схемах водоподготовки на ТЭС, для получения гарантированного качества воды перед УОО необходима предварительная коагуляция исходной воды. Проведенные исследования показали, что продолжительность контакта коагулянта с водой после введения и перемешивания должно составлять не менее 10 мин до подачи на установку ультрафильтрации (табл. 1 поз. 3 и 4). Установлено, что первичное хлорирование с дозой 0,5–1,0 мг/л по активному хлору существенно улучшает процесс и коагуляция возможна при меньших дозах. Однако, в случае применения хлорирования необходимо осуществлять связывание остаточного активного хлора для предотвращения повреждения мембран, чувствительных к нему.

Как показали исследования, проведенные на Среднеуральской ГРЭС, применение технологии напорной ультрафильтрации с предварительной коагуляцией для очистки природной воды обеспечивает стабильное уменьшение окисляемости (рис. 5) и цветности исходной воды, получение воды питьевого качества по требованиям СанПиН 2.1.4.1071-01 и требований к качеству питательной воды УОО.

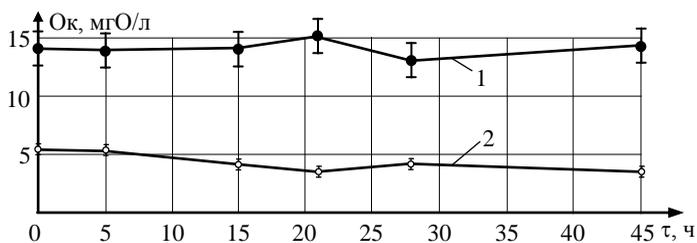


Рис. 5. Изменение перманганатной окисляемости исходной воды (1) и фильтрата УУФ (2) в ходе эксперимента

Установлено, что в качестве коагулянта возможно использование сульфата алюминия и полиоксихлорида алюминия или их смеси. Использование органических катионных коагулянтов-флокулянтов совместно с неорганическими алюминиевыми коагулянтами позволяет уменьшить дозу последних в 1,5 раза.

Были проведены исследования влияния температуры воды на эффективность очистки на УУФ. Испытания проводились на подогретой воде при температуре 28–30 °С, а также на холодной воде при температуре 8–11 °С. В качестве коагулянта использовался сульфат алюминия. Проведенные исследования показали, что хотя процесс коагуляции на холодной воде протекает хуже, чем на подогретой, очистка методом ультрафильтрации остается стабильной при небольшом увеличении дозы коагулянта. Это связано с увеличением задерживающей способности мембраны при возрастании вязкости воды, что выгодно отличает метод ультрафильтрации от традиционных методов предочистки, где уменьшение температуры воды ведет к росту дозы реагентов и проскоку алюминия в фильтрат.

Оптимальным временем контакта при коагуляции на холодной воде является 15–20 минут и меньше, но не менее 5 минут.

Следующим этапом работы проведено сравнение основных технологических характеристик часто употребляемых мембранных элементов УУФ: Hydracap 60 (фирма HYDRANAUTICS), SXL225FSCC (фирма NORIT) и SFX-2660 (фирма DOW CHEMICAL) при обработке воды Исетского озера (Среднеуральская ГРЭС). Изменение проницаемости мембранных элементов в процессе работы показано на рис. 6. Из изученных мембранных элементов наилучшими рабочими характеристиками обладают элементы SXL225FSCC фирмы NORIT, показавшие высокую проницаемость мембран (выше 200 л/(м<sup>2</sup>·ч·атм)) при устойчиво небольшом трансмембранном давлении в пределах 0,028–0,04 МПа и расходе воды на обратную промывку 330 л/(м<sup>2</sup>·ч).

Как показали pilotные испытания, технология обратного осмоса может быть эф-

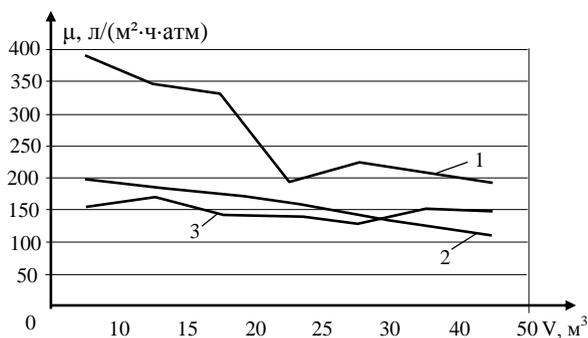


Рис. 6. Изменение проницаемости различных типов мембранных элементов УУФ в зависимости от количества пропущенного фильтрата:

1 – SXL225FSCC; 2 – SFX-2660; 3 – Hydracap 60

фективно использована для обессоливания осветленных и умягченных природных вод, в том числе фильтрата УУФ. Наряду с глубокообессоленной водой при этом может быть получен концентрированный солевой раствор, пригодный для технологических нужд.

С участием автора, сотрудниками ЗАО «НПК Медиана-фильтр» были проведены опыты на предприятии по производству аммиачной селитры, которые дали положительные результаты при обработке технологической воды – конденсата сокового пара. При использовании дополнительной (второй) ступени обратного осмоса и мембранной дегазации была получена обессоленная вода с содержанием солей в пермеате менее 2 мг/л, которая может быть использована в качестве добавочной воды энергетических котлов-утилизаторов. При этом было получено предельное содержание нитрата аммония в концентрате около 50–60 г/л (при использовании дополнительной ступени обратного осмоса), что позволяет использовать раствор как товарный продукт.

**Пятая глава** посвящена разработке рекомендаций по совершенствованию технологии и выбору схем обессоливания воды.

На основании проведенного исследования предложена схема комбинированной мембранно-ионообменной установки (рис. 7). Такая схема характеризуется высокой надежностью, т.к. даже при возможных нарушениях работы системы обратного осмоса узел доочистки обеспечит заданное качество воды. Вместе с тем, сохраняется необходимость в использовании кислоты и щелочи, поэтому данная технология, хоть и в значительно меньшей степени, имеет те же недостатки, что и традиционная. Такая технология внедрена с участием автора на Новочеркасской ГРЭС, Шатурской ГРЭС, ТЭЦ-11 Иркутскэнерго, РТС «Строино».

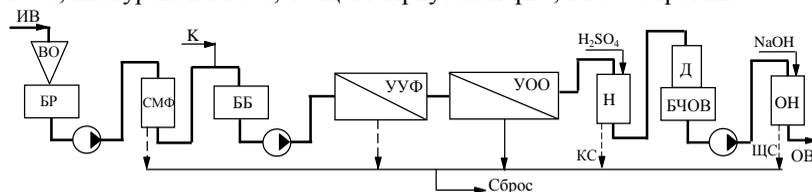


Рис. 7. Схема комбинированной установки для подготовки глубоко обессоленной воды с применением ионообменной доочистки:

ВО – воздухоотделитель; БР – емкость разрыва струи; СМФ – самопромывные механические фильтры; ББ – буферные емкости; УУФ – узел ультрафильтрации; Д – декарбонизатор; БЧОВ – бак частично обессоленной воды

После реконструкции по комбинированной схеме ВПУ Шатурской ГРЭС, имеющей номинальную производительность 250 м<sup>3</sup>/ч, потребность в кислоте уменьшилось с 950 до 40 т/год, а щелочи – с 450 до 12 т/год, по сравнению с технологией традиционного химического обессоливания, что позволило сэкономить 50 млн руб. в год. При этом обеспечивалось

содержание в обессоленной воде:  $C_{Na^+} \leq 15$  мкг/дм<sup>3</sup>,  $C_{SiO_2} \leq 20$  мкг/дм<sup>3</sup>, а  $\chi \leq 0,5$  мкСм/см.

При активном участии автора была разработана, обоснована и внедрена комплексная схема, включающая следующие мембранные технологии: ультрафильтрацию, обратный осмос и электродеионизацию (рис. 8). Отличительной особенностью этой схемы является узел доочистки – установка электродеионизации, являющейся безреагентной альтернативой ионному обмену в производстве глубокообессоленной воды.

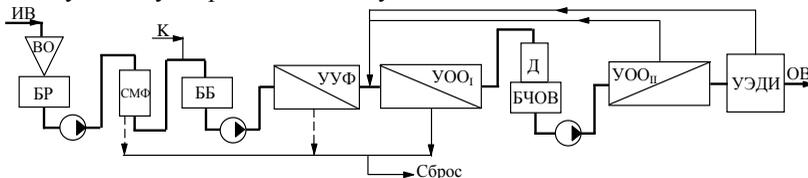


Рис. 8. Схема комплексной установки для подготовки глубоко обессоленной воды с применением доочистки электродеионизацией:

УЭДИ – узел доочистки электродеионизацией

Для повышения надежности работы комплексной мембранной схемы водоподготовки предусматривается использование на стадии предварительного обессоливания установки двухступенчатого обратного осмоса. В этом случае качество воды, питающей установку электродеионизации, заведомо выше требований производителей, и любые нарушения в работе установок обратного осмоса становятся не критичными. При ухудшении эффективности работы первой ступени заданное качество гарантированно обеспечит вторая ступень. Ее надежность существенно выше, поскольку эта ступень работает в значительно более «мягких» условиях эксплуатации. Надежность работы ВПУ в целом возрастает и приближается к показателям ВПУ на базе ионного обмена. Суммарная стоимость ВПУ при этом увеличивается на 10–15 % по сравнению с вариантом с одной ступенью обратного осмоса, но остается все же ниже, чем стоимость комбинированной установки с ионным обменом в случае нового строительства.

Такая схема обеспечивает минимальный расход реагентов и наивысшую экологичность (минимальные сбросы солей) водоподготовки (рис. 9) при высоком качестве обессоленной воды.

Сотрудниками ЗАО «НПК Медиана-фильтр», при непосредственном участии автора, проведен ряд проектных, пуско-наладочных работ для интегрированной мембранной технологии на Краснодарской ТЭЦ, на ОАО «Тобольск-Полимер», Первомайской ТЭЦ-14 ОАО «ТГК-1».

Проведенные исследования показали, что эффективная безаварийная работа установок электродеионизации обеспечивается лишь при высоком качестве подаваемой на них воды. Было установлено, что для

оценки качества воды необходимо учитывать не только фактически измеренную электропроводность, но и концентрации слабых кислот, таких как кремниевая и угольная. Для оценки качества получаемой обессоленной воды на представленных схемах, предложено вместо электропроводности использовать понятие приведенной удельной электропроводности, которая может рассчитываться по следующей формуле:

$$\chi = \chi_{\text{изм}} + 2,66C_{\text{CO}_2} + 1,94C_{\text{SiO}_2}, \quad (2)$$

где  $\chi_{\text{изм}}$  – фактически измеренная удельная электропроводность;  $C_{\text{CO}_2}$  – концентрация свободной углекислоты, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{SiO}_2}$  – концентрация кремниевой кислоты, мг/дм<sup>3</sup>.

Использование данной величины позволяет оценить реальную ионную нагрузку на аппарат при наличии в воде слабодиссоциирующих примесей, оказывающих малое влияние на измеряемую удельную электропроводность с учетом диффузии и диссоциации слабых минеральных кислот.

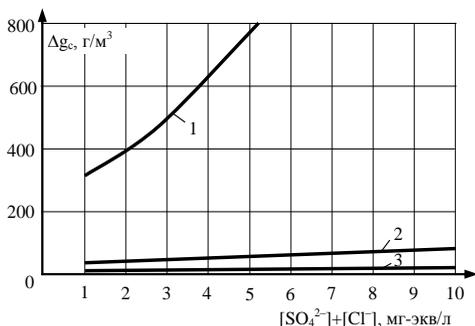


Рис. 9. Удельный сброс солей без учета сброса солей поступающей с исходной водой в зависимости от метода обессоливания и минерализации исходной воды:

1 – традиционное химическое обессоливание (литературные данные); 2 – комбинированная схема; 3 – комплексная схема

В заключительной части диссертации приведены результаты исследований работы фильтров смешанного действия (ФСД) с выносной регенерацией для повышения эффективности гидроперегрузки ионитов. С целью совершенствования технологии предложено использовать фильтры с «ложным» днищем. Проведенные стендовые исследования показали, что такое технологическое решение обеспечивает лучшую гидродинамику в аппарате за счет более равномерного распределения потоков воды и растворов по сечению аппаратов на их концевых участках. Наиболее оптимальной является конструкция с нижней выгрузкой ионитов из ФСД по центру нижнего распределительного устройства с применением водо-воздушной промывки. Отработан процесс перегрузки ионитов с определением окончания операции выгрузки по перепаду давления.

Для обеспечения требований к качеству поступающей на УОО воде рассмотрена коагуляционная очистка природных маломутных цветных вод

с низким содержанием. Отсутствие центров коагуляции, стабилизирующее действие гуминовых кислот приводит к замедлению процессов хлопьеобразования и ухудшению общего качества очистки. Автором проведены лабораторные и промышленные исследования методом коагуляционной очистки поверхностных вод с введением в воду тонкодисперсного песка с размером частиц 100–150 мкм, для ускорения процессов хлопьеобразования и осаждения. Проведенные промышленные испытания осветлителя с вводом микропеска на ТЭЦ-1 ОАО «Северсталь» при коагуляционной обработке воды реки Шексна ( $O_2=13-17$  мг/л,  $[Fe]=0,7$  мг/л;  $[SiO_2]=1,5$  мг/л) показали:

- массовая концентрация механических примесей в коагулированной воде не более 1 мг/л, что позволяет сократить расход воды на собственные нужды последующих механических фильтров и эксплуатировать их с повышенными скоростями фильтрования;
- окисляемость коагулированной воды находится в пределах погрешности химического анализа и составляет примерно 3 мгО/л.

Осветление воды с использованием тонкодисперсного песка в качестве искусственного замутнителя внедрено на предприятии Сибур-Химпром в г. Пермь и на центральной котельной г. Астрахань. В настоящее время идёт внедрение этой технологии на Алексинской ТЭЦ и Череповецкой ГРЭС.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. В рамках данной работы созданы и апробированы лабораторные стенды и пилотные установки коагуляционной, ультрафильтрационной и обратноосмотической обработки воды. Проведенные испытания на Среднеуральской ГРЭС (2008 г.), Шатурской ГРЭС (2008 г.), Петрозаводской ТЭЦ (2010 г.), Череповецкой ГРЭС (2012 г.) показали необходимость глубокой предварительной очистки природной воды с повышенным содержанием железоорганических соединений, включающей коагуляционное осветление природной воды, как правило, в сочетании с добавлением флокулянта.

2. Разработаны методики проведения лабораторных исследований и промышленных испытаний перспективных технологий обработки воды, основанные на традиционных методах химического анализа водного теплоносителя и учитывающие требования к качеству воды и технологическим режимам со стороны производителей нового водоподготовительного оборудования. Разработана методика расчета технико-экономических показателей различных схемных решений для установок глубокого обессоливания природных вод.

3. Для систем противоточной ионообменной технологии обессоливания воды получены:

- температурные зависимости минимально необходимой скорости восходящего потока и удельного потребления электроэнергии на подачу обрабатываемой воды через слой фильтрующего материала;
- схемные решения с рециркуляцией части обрабатываемой воды, обеспечивающие расширение рабочего диапазона производительности и устойчивую эксплуатацию обессоливающей установки;
- зависимости рабочей обменной ёмкости ионов от концентрации регенерационного раствора и времени контакта с ним;
- предложенная противоточная технология «ГравиСофт» позволяет по сравнению с технологией UPCORE уменьшить расход соли на регенерацию на 10 %, а расход воды на собственные нужды – на 15 %.

4. Для систем мембранной технологии обессоливания природных вод с повышенным содержанием органических примесей получено следующее.

4.1. Применение напорной ультрафильтрации с предварительной коагуляцией обеспечивает получение воды питьевого качества по требованиям СанПиН 2.1.4.1071-01 и требований к качеству питательной воды УОО. В качестве коагулянта рекомендовано использование сульфата алюминия и полиоксихлорида алюминия или их смеси. Использование органических катионных флокулянтов позволяет уменьшить дозу коагулянта в 1,5 раза. При увеличении окисляемости исходной воды более 15 мгО/л и уменьшении щелочности менее 0,5 мг-экв/л рекомендуется первичное хлорирование с дозой 0,5–1,0 мг/л по активному хлору.

4.2. Из изученных мембранных элементов УУФ на водах Исетского озера (Среднеуральская ГРЭС) наилучшими рабочими характеристиками обладают элементы SXL225FSCC фирмы NORIT, показавшие высокую проницаемость мембран (выше 200 л/(м<sup>2</sup>·ч·атм)) при устойчиво небольшом трансмембранном давлении в пределах 0,028–0,04 МПа и расходе воды на обратную промывку 330 л/(м<sup>2</sup>·ч).

4.3. Исследования по обессоливанию воды на двухступенчатой УОО показали, что подключение второй ступени по пермеату не изменяет качества очистки воды на первой ступени, при снижении показателей второй ступени. Так, коэффициент очистки воды по общему солесодержанию снизился от 10 (первая ступень УОО) до 1,2–2,0 на второй ступени, что определяется невысоким солесодержанием пермеата первой ступени, поступающего на вход второй ступени УОО. Возвращение концентрата второй ступени на вход УОО повышает технологические показатели УОО и обеспечивает качество фильтрата, приемлемое для энергетических котлов средних параметров.

Подключение второй ступени УОО по концентрату первой ступени показало возможность дальнейшего глубокого концентрирования водно-

го раствора – коэффициент концентрирования после второй ступени составил 7–9, что так же повышает технологические показатели УОО.

На основании проведенных исследований была предложена схема и даны рекомендации для проектирования промышленной установки обратного осмоса для подготовки добавочной воды паровых котлов.

5. Предложены перспективные технологические схемы глубокого обессоливания воды:

- с использованием комбинированной технологии мембранной и ионообменной очистки осветленной природной воды;
- с использованием интегрированных мембранных технологий.

Разработаны технологические регламенты для таких установок. Разработана расчетная программа технико-экономической оценки для установок разного состава оборудования и проведены расчетные исследования для различных схем, в частности, для условий работы ВПУ Ангарской ТЭЦ.

6. Проведенные стендовые исследования и промышленные испытания осветлителя показали, что введение в воду тонкодисперсного песка с размером частиц 100–150 мкм, позволяет улучшить качество коагулированной воды: массовая концентрация механических примесей не более 1 мг/л, а окисляемость – не более 3 мгО/л.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Повышение** эффективности осветлителей для коагуляционной обработки воды / В.Н. Виноградов, Б.А. Смирнов, **А.В. Жадан** [и др.] // Теплоэнергетика. 2010. №8. С.14–16.
2. **Проектные** решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, **А.В. Жадан** [и др.] // Теплоэнергетика. 2012. №7. С.30–36.
3. **Пуск** системы водоподготовки ПГУ-410 на Краснодарской ТЭЦ / А.А. Пантелеев, **А.В. Жадан**, С.Л. Громов [и др.] // Теплоэнергетика. 2012. №7. С.37–39.
4. **Жадан, А.В.** Практическая реализация противоточной технологии ионного обмена // А.В. Жадан, Е.Н. Бушуев / Вестник ИГЭУ. Вып. 5, 2012, С.10–15.
5. Обобщение опытов предварительной очистки воды на ТЭС / В.Н. Виноградов, **А.В. Жадан**, Б.А. Смирнов [и др.] // Вестник ИГЭУ. Вып. 1, 2011, С.10–16.
6. Бушуев, Е.Н. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, **А.В. Жадан** // Вестник ИГЭУ. Вып. 1, 2013, С.8–14.
7. **Жадан, А.В.** Особенности практической реализации эффективных ионообменных систем / А.В. Жадан // Энергетик. 2013. №2. С.35–38.

### *Публикации в других изданиях*

8. Пантелеев А.А., Рябчиков Б.Е., Громов С.Л., **Жадан А.В.**, Тагиев Р.Г., Поваров Е.В., Боровский Ю.П., Чеканин А.В. // Фильтрационное устройство. Патент РФ на полезную модель № 111019; опубликовано 10.12.2011 (заявка 2011121456/05 от 24.05.2011)
9. Виноградов В.Н., **Жадан А.В.**, Смирнов О.В., Аван В.К. Исследование эффективности осветлителя с рециркулирующим микропеском / Повышение эффективности энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. IX –М.: Энергоатомиздат. 2009, С.182–188.
10. Современные подходы при строительстве ВПУ с использованием мембранных технологий / И.Ш. Заргетдинов, В.В. Тропин, **А.В. Жадан** [и др.] // Повышение эффективности

- энергетического оборудования. V Всероссийская науч.-практ. конф.: 1–2 нояб. 2010. Материалы конф. / Под ред. А.В. Мошкарина. –Иваново. ГОУ ВПО ИГЭУ, 2010, С.105–113.
11. Современные подходы при строительстве ВПУ с использованием технологий термического обессоливания / И.Ш. Загреддинов, В.В. Тропин, **А.В. Жадан** [и др.] // Повышение эффективности энергетического оборудования. V Всероссийская науч.-практ. конф.: 1–2 нояб. 2010. Материалы конф. / Под ред. А.В. Мошкарина. –Иваново. ГОУ ВПО ИГЭУ, 2010, С.113–118.
12. Сравнение способов предварительной очистки воды на ТЭС. Ультрафильтрация и обработка в осветлителях и механических фильтрах / **А.В. Жадан**, Б.А. Смирнов, О.В. Смирнов [и др.] // Повышение эффективности энергетического оборудования. V Всероссийская науч.-практ. конф.: 1–2 нояб. 2010. Материалы конф. / Под ред. А.В. Мошкарина. –Иваново. ГОУ ВПО ИГЭУ, 2010, С.118–126.
13. Сравнение способов предварительной очистки воды на ТЭС. Флотация, микрофильтрация и обработка в осветлителях с микропеском / **А.В. Жадан**, Б.А. Смирнов, О.В. Смирнов [и др.] // Повышение эффективности энергетического оборудования. V Всероссийская науч.-практ. конф.: 1–2 нояб. 2010. Материалы конф. / Под ред. А.В. Мошкарина. –Иваново. ГОУ ВПО ИГЭУ, 2010, С.126–134.
14. Бушуев Е.Н., Ларин А.Б., **Жадан А.В.** Опыт освоения новых технологий обработки воды на ТЭС // Повышение эффективности энергетического оборудования. VI Всероссийская науч.-практ. конф.: 6–8 дек. 2011. Материалы конф. / Под ред. А.В. Мошкарина. –Иваново. ГОУ ВПО ИГЭУ, 2011, С.298–303.
15. Бушуев Е.Н., Еремина Н.А., **Жадан А.В.** Состояние и анализ новых технологий водоподготовки на ТЭС // Повышение эффективности энергетического оборудования. VII Всероссийская науч.-практ. конф.: 13–15 ноября 2012. Материалы конф. –С.-Петербург, 2012, С.233–245.
16. **Жадан, А.В.** Опыт освоения новых технологий обработки воды на базе мембранного метода / А.В. Жадан, А.А. Гомырова // Материалы докладов VII Междунар. науч. конф. «Гинчуриные чтения». –Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. Т.2. С.132–133.
17. Ресурсосберегающие и энергоэффективные схемы в промышленной водоподготовке. / И.Ш. Загреддинов, В.В. Тропин, **А.В. Жадан** [и др.] // Новое в российской электроэнергетике. 2009. № 1. С. 27–39.
18. **Жадан, А.В.** Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / А.В. Жадан, Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина // Новости теплоснабжения. № 7, 2013, С.35–40.
19. Ресурсосберегающие и энергоэффективные мембранные технологии в промышленной водоподготовке. / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, **А.В. Жадан** [и др.] // Мембраны 2010: матер. всерос. науч.-техн. конф. – М, 2010. Т. 2. С. 127.
20. Оборудование для очистки воды коагуляцией. Ч.1. направления совершенствования отечественного оборудования. / Б.Е. Рябчиков, А.А. Пантелеев, **А.В. Жадан** [и др.] // Водоснабжение и канализация. 2013. № 3–4. С.100–114.
21. Выбор технологических схем при строительстве новых и реконструкции старых водоподготовительных установок / М.П. Ковалев, **А.В. Жадан**, А.А. Пантелеев [и др.] // Водоподготовка и водно-химические режимы ТЭС. Цели и задачи: матер. IV междунар. науч.-техн. конф. –М.: 2013. С. 23–24.

---

ЖАДАН Александр Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОДЫ НА ТЭС  
НА БАЗЕ ИОННОГО ОБМЕНА И МЕМБРАННЫХ МЕТОДОВ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 20.11.2013. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.

Печать плоская. Усл.печ.л. 1,16.

Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

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

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ