

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

На правах рукописи



Шаповалов Дмитрий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЗАДАЧАХ
ПОСТРОЕНИЯ ВПУ ДЛЯ ТЭС**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор А.А. Пантелеев

Москва 2016

Список использованных сокращений

- БПО – блок предварительной очистки;
- ВПУ – водоподготовительная установка;
- ГТУ – газотурбинная установка;
- Дк – декарбонизатор;
- ЗРА – запорно-регулирующая арматура;
- И – испаритель;
- ИМТ – интегрированные мембранные технологии;
- ИО – ионный обмен;
- КИП – контрольно-измерительный прибор;
- КУ – котел-утилизатор;
- МБ – мембранный блок;
- МФ – механический фильтр;
- МЭ – мембранный элемент;
- Н – насос;
- ОМЭ – обобщенный мембранный элемент;
- ОО – обратный осмос;
- ОПХ – определение персональных характеристик;
- ПГУ – парогазовая установка;
- ПДК – предельно допустимая концентрация;
- ПДС – предельно допустимый сброс;
- ПИ – пилотные испытания;
- ПМУ – пилотная мембранная установка;
- ПТ – паровая турбина;
- ПТУ – паротурбинная установка;
- ПФМ – пробный фильтрующий модуль;
- СОО – система оборотного охлаждения;
- СОУП – система оптимизации установочного порядка;
- СХО – станция химической очистки;

ТМУ – тестовая мембранная установка;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

УОО – установка обратного осмоса;

УУФ – установка ультрафильтрации;

УЭДИ – установка электродеионизации;

ФСД – фильтр смешанного действия;

ХВО – химводоочистка.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОДОПОДГОТОВКИ	17
1.1. Оценка текущего состояния рынка потребителей обессоленной воды в энергетике. Перспективы развития энергетических мощностей в России	17
1.2. Состояние технологий обработки добавочной воды	19
1.2.1. Анализ применения ионообменной технологии	20
1.2.2. Анализ применения термического метода обессоливания	23
1.2.3. Анализ применения и внедрения мембранных технологий	26
1.3. Тенденция развития и совершенствования технологий водоподготовки	33
1.3.1. Пути модернизации ВПУ на основе обратноосмотических установок	36
1.4. Анализ методов моделирования и проектирования установок обратного осмоса	39
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПИЛОТНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА	42
2.1. Особенности работы установок обратного осмоса	42
2.2. Технологическое проектирование. Особенности, требования и ограничения	44
2.3. Технические параметры и характеристики мембраны	48
2.4. Пилотное моделирование установок обратного осмоса. Рекомендации и требования к проведению пилотных испытаний	50
2.5. Экспериментальное сравнение работы тестовых и пилотных мембранных установок	62
2.5.1. Методика проведения эксперимента	63

2.6. Экспериментальное определение истинной селективности и коэффициента солепропускания обратноосмотической мембраны. Методика проведения и результаты экспериментов	66
2.7. Оценка погрешности экспериментальных данных	70
2.8. Выводы по главе	74
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОНОВКИ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСТАНОВКАХ ОБРАТНОГО ОСМОСА.....	
3.1. Основные характеристики установок обратного осмоса	76
3.2. Система оптимизации установочного порядка. Определение персональных характеристик мембранных элементов	79
3.3. Определение времени стабилизации рабочих параметров мембранных элементов	89
3.4. Выводы по главе	91
ГЛАВА 4. ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСТАНОВКАХ ОБРАТНОГО ОСМОСА.....	
4.1. Анализ стандартных подходов к проведению химической очистки установок обратного осмоса.....	93
4.2. Определение основных технологических задач проведения процедуры химической очистки	96
4.3. Система локального мониторинга загрязнений установок обратного осмоса.....	98
4.3.1. Требования к пробным фильтрующим модулям	99
4.4. Описание технологии моделирования процессов химической очистки	101
4.5. Выводы по главе	105
ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСХОДНОЙ ВОДЫ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА.....	
	106

5.1. Основные исследуемые параметры работы установки обратного осмоса	107
5.2. Влияние переменной температуры исходной воды на параметры работы установки обратного осмоса	109
5.2.1. Методика проведения экспериментов по изучению влияния переменной температуры на параметры работы установки обратного осмоса	110
5.3. Влияние рециркуляции концентрата на изменение температуры входной воды и параметры работы установки обратного осмоса	122
5.3.1. Методика проведения экспериментов по изучению влияния системы рециркуляции на изменение входной температуры, селективность и производительность установки	123
5.4. Выводы по главе	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ №1. АКТ ВНЕДРЕНИЯ	143

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие тепловой и атомной энергетики, крупной нефтегазовой промышленности, производства удобрений и химикатов, а также многих других областей индустрии требует применения огромного количества различных ресурсов, в том числе и водных. Вода используется как теплоноситель, компонент для приготовления и разбавления, охлаждения. Каждое отдельное производство или технология требуют получения воды определенного качества.

Глубокое, стремительное и всестороннее развитие теплоэнергетики требует применения качественно подготовленной воды, и соответственно, совершенствования технологии ее подготовки [1]. Стоит отметить, что при создании новых энергоблоков, в большинстве своем, предпочтение отдается строительству парогазовых установок (ПГУ) [2]. Важно знать, что к качеству добавочной воды для ПГУ предъявляются жесткие и самые высокие требования с целью обеспечения надежности, эффективности и стабильности работы установки. Связано это, во многом, со сложностью и многокомпонентностью применяемого оборудования, работой при высоких нагрузках и температурных параметрах, требованием к минимизации ремонтов и внештатных остановов.

Получение обессоленной и глубокообессоленной воды необходимо с целью снижения загрязнений теплопередающих, охлаждающих поверхностей и поверхностей нагрева в котлах отложениями соединений кальция, магния, железа, органических и кремнесодержащих примесей и многих других, защиты металла от коррозии, снижение вероятности образования отложений на лопатках турбин и в конденсаторах, увеличения межпромывочных интервалов энергетического оборудования. Следует учесть, что образование отложений и увеличение скорости коррозии конструкционных материалов происходит при поступлении в тракт различных примесей с добавочной водой, присосами в конденсаторах и пр. Вследствие этого происходит

изменение гидродинамических и массообменных характеристик. Интенсификация образования отложений и процессов коррозии при высоких параметрах значительна, поэтому при воздействии постоянных нагрузок необходимо максимально возможно избежать повреждений энергетического оборудования. Таким образом, эффективность, экономичность и надежность работы оборудования напрямую связаны с технологиями и качеством очистки воды [3-6]. Существует достаточное количество зарекомендовавших себя способов очистки и обессоливания воды [7, 8]. Важную роль «играет» тип используемых конструкционных материалов трубопроводов, теплообменного оборудования (подогреватели высокого и низкого давления, сетевые подогреватели, конденсатор).

Одним из самых эффективных и зарекомендовавших себя методов считается химическое обессоливание ионным обменом. Эта технология продолжительное время обеспечивает тепловые электрические станции (ТЭС) водой требуемого качества. В зависимости от параметров энергетического оборудования и требований к степени очистки добавочной воды может применяться, например, двух- или трехступенчатое обессоливание, с возможной финишной доочисткой на фильтрах смешанного действия [9]. Данный способ со времен начала своего использования претерпел уже много модернизаций не только самой технологии осуществления циклов работы фильтров (прямоточная или противоточная технология), но и производства ионообменных смол (гелевые, моно- и полидисперсные и т.д.) [10]. Совершенствование технологии в настоящее время позволяет при хорошей подготовке снизить количество ступеней обессоливания, увеличить диапазон скоростей фильтрации, снизить количество регенерационных растворов и высокоминерализованных сточных вод от регенерации [11].

Известно, что требования к водоотведению постоянно ужесточаются, поэтому эффективное использование водных ресурсов, снижение их потребления, а также снижение загрязнения водоемов

антропогенными минерализованными и тепловыми сбросами сточных вод является актуальной задачей в ближайшем будущем [12, 13]. Поэтому, с целью получения оптимальных схем задачу водоподготовки необходимо решать в комплексе с вопросом очистки и утилизации образующихся загрязненных сточных вод [14, 15].

Решение поставленной задачи возможно осуществить путем применения безреагентных методов очистки. Использование термического обессоливания позволяет решить проблему сокращения водопотребления на ТЭС [16]. Применение испарительных установок для создания малоотходных комплексов позволяет с достаточной степенью эффективности снизить риск загрязнения окружающей среды [17, 18]. Что также немаловажно, этот метод позволяет получить обессоленную воду, качество которой соответствует нормам ПТЭ для питания котлов 13,8 МПа [19]. Однако, высокая металлоемкость оборудования, высокое энергопотребление (для случаев с низкой производительностью ВПУ) и необходимость проведения трудоемких работ по очистке от загрязнений теплопередающих поверхностей привели к тому, что преимущества метода оказались менее весомыми по сравнению с недостатками.

Поэтому, создание высокоэффективных схем получения обессоленной воды с минимальным воздействием на окружающую среду стало возможным благодаря применению мембранных методов [20-22]. Данная технология не требует использования больших количеств реагентов, что делает ее внедрение наиболее привлекательным. Широкие возможности мембранного разделения позволяют их использовать на всех стадиях подготовки и очистки воды: предочистка (микрофльтрация, ультрафльтрация), обессоливание (обратный осмос), финишное глубокое обессоливание (электродеионизация), очистка сточных вод [23]. Тяжелый труд и множество исследований и разработок зарубежных и отечественных ученых позволили на практике внедрить в механизмы получения очищенной воды мембранные методы. Этот значительный опыт позволил на практике реализовать схемы, которые

обеспечивают высокую эффективность, экономичность, требуемое качество продукта и надежность эксплуатации [24]. Эффективная, надежная и экономически выгодная работа основного энергетического оборудования обеспечивается при минимальных расходах реагентов, правильной эксплуатации и проведении своевременных ремонтов и сервисов [25].

Стоит отметить, что при строительстве новых блоков ПГУ предпочтение отдается применению именно мембранных методов. При реконструкции существующих ионитных установок с целью исключения сбросов высокоминерализованных сточных вод и снижения потребления концентрированных реагентов внедряют мембранные методы [26-28]. В последнее время наметилась тенденция создания комбинированных схем на базе мембранного и ионитного обессоливания. Наиболее привлекательным с точки зрения расширения возможностей применения и исследования кажется обратный осмос, поскольку возможности его еще не изучены в полном объеме [29]. Совершенствование этой технологии претерпело уже много стадий с момента использования в задачах водоподготовки, но многие вопросы остаются до сих пор нерешенными. Поэтому, исследование и разработка путей оптимизации и совершенствования режимов работы обратноосмотических установок с целью расширения возможностей применения, а также простоты эксплуатации оборудования, видится особенно актуальной задачей.

Обратный осмос – процесс мембранного разделения жидких смесей путем преимущественного проникновения через полупроницаемую мембрану растворителя под действием приложенного к раствору давления, превышающего его осмотическое давление [30].

За последние годы произошло много различных изменений не только в организации процесса разделения на обратноосмотических мембранах, но и в оптимизации технологии работы и режимов эксплуатации установок обратного осмоса. Совершенствование применяемых материалов в конструкциях установок позволило максимально возможно минимизировать

образование различного рода протечек и дефектов конструкций [31]. Однако, вопрос оптимизации режимов является важным направлением развития данного метода.

Следует выделить различные аспекты, совершенствование которых поможет в дальнейшем обеспечить надлежащее качество работы при минимальных затратах на эксплуатацию. Ввиду появления множества различных производств обратноосмотических мембран растет конкуренция. Однако, качество производимых мембранных элементов различное: селективность как общая, так и по многим компонентам отличается, что подтверждается множеством проведенных экспериментов.

Теоретические знания пока не позволяют определить селективность мембран по различным компонентам. По большинству соединений селективность мембраны неизвестна. Поэтому и компьютерное моделирование не позволяет в полном и достоверном объеме осуществить подбор и рассчитать все параметры и характеристики работы установки.

Применимость метода обратного осмоса для специальных задач обессоливания воды изучается и находит применение. Однако, получение воды, которая соответствует качеству для барабанных котлов 9,8 МПа или 13,8 МПа является достаточно сложной задачей. Поскольку двухступенчатое обессоливание на УОО не всегда позволяет получить требуемые показатели. Зависит от качества предочистки и непосредственно от состава исходной воды. Для оценки применимости данного технологического решения используют расчетное моделирование, но оно позволит дать только лишь оценку возможности получения требуемого качества на двухступенчатом осмосе. Достаточно же полную характеристику применимости данного метода может дать проведение пилотных испытаний (ПИ). По результатам их выполнения можно получить полную оценку и экспериментальное подтверждение возможности применения данного метода для получения обессоленной воды, соответствующей требованиям, для подпитки котлов.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности эксплуатации установок обратного осмоса в системах водоподготовки и водоочистки путем оптимизации режимов их работы.

Для достижения указанной цели в работе решается ряд задач:

1. Разработать методику проведения пилотных испытаний, моделирующую процесс работы промышленной установки обратного осмоса. Определить основные требования к процедуре проведения испытаний и конструкции пилотных установок, обеспечивающие достоверность результатов;

2. Разработать методику определения значения истинной селективности обратноосмотических мембран по определенному компоненту на тестовых мембранных установках при заданных рабочих условиях;

3. Разработать систему оптимизации компоновки мембранных элементов в установках обратного осмоса, учитывающую разброс их рабочих характеристик;

4. Разработать метод подбора и оптимизации технологии химической очистки мембранных элементов в промышленных установках обратного осмоса;

5. Выполнить исследование и анализ влияния переменной рабочей температуры исходной воды на показатели работы установок обратного осмоса.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается применением методически обоснованных расчетов и контролем точности полученных численных данных при проведении экспериментов и испытаний; применением стандартизированных методов измерений и анализа физико-химических показателей состава воды; экспериментальной проверкой и положительным опытом применения предложенных методов оптимизации режимов работы установок обратного осмоса в условиях промышленной эксплуатации; сопоставлением отдельных полученных результатов с

результатами других авторов, опубликованными в технической литературе и относящихся к исследуемым установкам.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложено для промышленных установок обратного осмоса ввести понятие обобщенного мембранного элемента (ОМЭ) – базового модуля, содержащего в своем наборе n стандартных серийно выпускаемых мембранных элементов. Показано, что для надежного моделирования режимов работы промышленных блоков, пилотные установки должны использовать ОМЭ в качестве базового элемента. Предложены и исследованы различные типы пилотных установок.

2. Разработан метод определения истинной селективности (солепропускания) обратноосмотической мембраны, основанный на результатах экспериментальных измерений на серийно выпускаемых мембранных элементах и численных расчетов на базе разработанной математической модели обработки полученных данных.

3. Для оптимизации работы промышленных установок обратного осмоса разработан новый метод выбора компоновки обратноосмотических элементов, включающий экспериментальные испытания и расчетную обработку полученных данных.

4. Впервые предложены метод и технология оптимизации параметров химической очистки установок обратного осмоса, с использованием набора пробных фильтрующих модулей (ПФМ), позволяющие эффективно и экономично определить загрязнения промышленных установок и оперативно подобрать режимы химических очисток мембранных элементов.

Практическая ценность работы.

1) Разработаны рекомендации к конструкции пилотных установок и процедуре проведения пилотных испытаний, обеспечивающие надежность и достоверность результатов.

2) Представленный метод определения истинной селективности позволяет оперативно получать значения этого показателя по различным соединениям в реальных производственных условиях на основе использования простого и доступного оборудования.

3) Показана и апробирована на практике возможность оптимизации гидравлических и качественных параметров работы промышленных установок при возникновении разбросов характеристик по мембранным корпусам.

4) Предложено и успешно внедрено технологическое оборудование для отработки и определения эффективных параметров химической очистки установок обратного осмоса.

5) Результаты работы могут быть использованы инжиниринговыми и проектными организациями для решения различного класса задач при проектировании новых ВПУ и реконструкции существующих, использующих обратноосмотические установки.

Полученные в диссертации данные и разработанные методики были успешно внедрены и применяются техническим департаментом компании АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР» при проектировании и эксплуатации установок обратного осмоса (акт внедрения приложен к диссертации). Автор диссертации принимал непосредственное участие в исследованиях, испытаниях и апробации разработанных методик на промышленных установках в производственных условиях.

Личный вклад автора состоит в разработке методологии исследования и проведении промышленных пилотных испытаний установок обратного осмоса; непосредственном участии в пилотных испытаниях установок обратного осмоса; внедрении результатов исследований в проектные решения при создании технологических и схемных решений при проектировании новых ВПУ; проведении экспериментов и исследований, позволяющих повысить эффективность работы уже существующих

установок; создании методик оптимизации режимов эксплуатации оборудования.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на XIX, XX, XXI, XXII международных научно-технических конференциях «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, НИУ «МЭИ», 2013, 2014, 2015, 2016 гг.), VIII международном водно-химическом форуме (г. Москва, НИУ «МЭИ», 2015).

Публикации. Материалы исследований нашли отражение в 9 опубликованных работах, в том числе в 2-х статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в список ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, библиографического списка литературы из 128 наименований. Основной материал диссертации составляет 143 страницы печатного текста, включая 39 рисунков, 7 таблиц, 19 формул.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования схемных решений пилотных установок и методические указания к пилотному и опытно-промышленному моделированию процессов работы промышленных установок обратного осмоса;
2. Метод определения истинной селективности обратноосмотических мембран для заданных компонент на основе экспериментальных исследований на серийных обратноосмотических мембранных элементах и построенной для них теоретической модели, который позволяет измерять ее значение в области высоких концентраций и учитывать присутствие и влияние других веществ;
3. Система определения оптимального установочного порядка мембранных элементов в высокопроизводительной промышленной установке обратного осмоса, включая процедуру определения персональных характеристик мембранных элементов, которая позволяет повысить стабильность работы и эффективность очистки;

4. Экономная технология определения эффективных параметров процедуры химической очистки промышленных обратноосмотических установок на основе использования пробных фильтрующих модулей;

5. Результаты экспериментального исследования влияния переменной рабочей температуры на качество фильтрата при заданных рабочих параметрах установки и рекомендации по её настройке в этих условиях эксплуатации.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, д.ф.-м.н., профессору кафедры ТЭС ФГБОУ «НИУ «МЭИ» А.А. Пантелееву за помощь при подготовке диссертации.

Автор благодарит коллектив кафедры ТЭС и сотрудников АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР» за оказанную помощь, ценные замечания, советы и рекомендации, которые были учтены при подготовке работы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВОДОПОДГОТОВКИ

В первой главе выполнен обзор существующих и перспективных методов подготовки добавочной воды для ТЭС. Представлены особенности применения, преимущества и недостатки каждого из них. Приведена оценка степени разработанности и применимости методов. Дана характеристика способам создания и проектирования систем обратного осмоса. Представлены пути совершенствования и оптимизации режимов работы установок, механизмов выбора технологических и аппаратных схем.

1.1. Оценка текущего состояния рынка потребителей обессоленной воды в энергетике. Перспективы развития энергетических мощностей в России

Темпы роста многих областей промышленности во многом зависят от обеспеченности их энергоресурсами: паром, электричеством, теплом. Поэтому, совершенствование способов и технологий выработки этих ресурсов необходимо для создания качественно нового уровня производства.

Большинство существующих электростанций было построено еще до 80-90-х годов XX века. Отсюда следует вывод, что установленное там энергетическое оборудование устарело и имеет низкий технический уровень оснащенности. Также известно, что часть блоков выведена из эксплуатации по причине непригодности [32, 33].

Однако, по данным, полученным от крупнейших российских генерирующих компаний (СГК, ТГК-2, Э.ОН Россия), установлено, что для повышения качества и обеспечения надежности работы энергетического оборудования планируется выделение значительного количества денежных средств на реализацию программ ремонтов, модернизацию, перевооружение и обновление устаревшего парка техники. За 2015 год реализация таких мероприятий позволила снизить количество аварий и остановов в среднем на 6-10%.

Следует отметить, что в последние годы высокие темпы роста набирает строительство парогазовых установок. Применение данной технологии позволяет получить КПД выше на 15-20%, чем у обычных паровых блоков, что доказывает их эффективность. Качественно новый подход к созданию ПГУ определяет тенденции к дальнейшему совершенствованию энергетики с целью повышения экономических показателей, снижению воздействия на окружающую среду [34].

Известно, что перспективная технологи энергетики – ПГУ была изобретена в России. Но ввиду отсутствия инвестиций в 90-х годах прошлого века, ее развитие и освоение было «заморожено». Напротив, широкое распространение она получила за рубежом (Европа, США, Япония). К настоящему времени ситуация в нашей стране стабилизировалась и внедрение этих технологий идет высокими темпами. При этом, потребности в поставках оборудования для строящихся ПГУ блоках, в большинстве своем, покрываются за счет поставок дорогостоящей импортной продукции, поскольку местное производство уступает в споре за качество [35]. Длительный провал в научных разработках дает о себе знать. Однако, существующее положение призывает к организации производства современного оборудования в России, например, газовых турбин.

Отметим, что в области создания и производства паровых котлов и турбин, электрических генераторов ситуация куда более положительная. Изготовление этих видов оборудования в России можно обеспечить в необходимых объемах на отечественных предприятиях машиностроения с достаточно высоким уровнем качества. Что способствует удешевлению строительства новых и реконструкции существующих блоков на ТЭС.

Последние несколько лет в России наблюдается стабильная динамика роста вводов энергетических мощностей. Данная тенденция должна быть сохранена и в дальнейшем. На этом фоне российский рынок инжиниринговых услуг в энергетике требует разработок и внедрения новых современных технологий, нестандартных подходов к реализации проектов.

Это возможно осуществить путем проведения собственных исследований и применения зарубежного опыта выполнения успешных программ.

С целью обеспечения надежного функционирования энергосистемы страны также планируется сохранить темпы увеличения установленной мощности [36].

1.2. Состояние технологий обработки добавочной воды

Схемы водоподготовки, применяемые для получения обессоленной воды на ТЭС, основаны на обработке несколькими методами (по отдельности или в комплексе):

- ионообменный (химическое обессоливание);
- термический (дистилляция или выпаривание);
- мембранный (баромембранный, электродиализ).

Возможность применения того или иного способа, а возможно их сочетания, зависит от многих факторов, включающих:

- требования к очистке (зависит от параметров и типа энергетического оборудования);
- производительность водоподготовки (зависит от состава и количества оборудования, схемы ТЭС);
- требования к сбросам сточных вод (существует ли возможность утилизации или сброса на очистные сооружения);
- экономическую эффективность (капитальные затраты на строительство, эксплуатационные затраты);
- качество исходной воды (источник водоснабжения, качественный состав).

Описание и анализ вышеприведенных методов водоподготовки рассмотрены ниже. Принимается, что состав предподготовки перед основной технологией обеспечивает требуемое качество для воды, подаваемой на обессоливание.

1.2.1. Анализ применения ионообменной технологии

Одним из самых эффективных и зарекомендовавших себя методов считается химическое обессоливание ионным обменом, который также называется «традиционным». В зависимости от параметров энергетического оборудования, качества исходной воды и требований к степени очистки добавочной воды может применяться двух- и трехступенчатое обессоливание, включая финишную доочистку на фильтрах смешанного действия. Для паровых барабанных котлов низкого давления может применять одно- или двухступенчатое Na-катионирование. В литературе, посвященной технологиям водоподготовки, значительное место отводится обсуждению и описанию множества различных комбинаций схем ионного обмена [37, 38]. При подготовке химически обессоленной воды производится последовательное сочетание процессов H-катионирования и OH-анионирования [39]. Основу всех отечественных водоподготовительных установок составляют схемы ионитного обессоливания с применением параллельноточной технологии. К достоинству данной технологии следует отнести:

- высокая степень разработки и апробированности;
- высокий уровень надежности;
- простота проведения операции взрыхления ионита;
- возможность создания комбинированных эффективных схем (комбинированное обессоливание совместно с очисткой сточных вод);
- проведение совместных регенераций с целью сокращения расхода реагентов;
- возможность модернизации (реконструкция по противоточной схеме).

Однако, стоит выделить основные недостатки технологии:

- высокие удельные расходы реагентов (необходимость использования реагентного хозяйства);

- низкая производительность (ограничения скорости фильтрации);
- необходимость многоступенчатой очистки с целью получения воды высокого качества (для блоков СКД необходимо устанавливать три ступени ионирования);
- необходимость утилизации высокоминерализованных регенерационных сточных вод.

В силу широкой проработки метода, существует различное количество методов совершенствования. Приведем некоторые из них:

- повторное использование регенерационных растворов;
- создание малосточных схем с сокращением образования высокоминерализованных сточных вод;
- применение более качественных и совершенных ионообменных материалов, позволяющих оптимизировать стадии регенерации;
- модернизация и реконструкция фильтров (перенаправление потоков с целью снижения расхода реагентов).

Метод химического обессоливания со времени начала своего использования претерпел уже много модернизаций не только самой технологии осуществления циклов работы фильтров (прямоточная или противоточная технология), но и производства ионообменной смолы (гелевые, моно- и полидисперсные и т.д.). Совершенствование технологии в настоящее время позволяет при хорошей подготовке снизить количество ступеней обессоливания, увеличить диапазон скоростей фильтрации, снизить количество регенерационных растворов и высокоминерализованных стоков от них [40-42].

Большинство отечественных тепловых электростанций, построенных до 90-х годов XX века, получают обессоленную воду для подпитки котлов традиционным методом ионного обмена. Основа его работы заключалась в прямоточной технологии фильтрации и регенерации фильтров. Такая схема тянет за собой большие расходы реагентов и сбросы

высокоминерализованных сточных вод [43]. Степень проработки за столько лет уже достаточна, имеется много справочной и нормативной документации, позволяющей с легкостью произвести расчет схемы или найти необходимую информацию. Одним из самых эффективным методов оптимизации был переход к противоточным схемам [44]. Существует несколько типов таких схем:

- фильтрация сверху-вниз, регенерация снизу-вверх (Амберпак и модификации);
- фильтрация снизу вверх, регенерация сверху-вниз (Швебебет и модификации);
- двухпоточно-противоточные технологии (одновременная регенерация сверху и снизу).

Эти схемы позволяют повысить скорости фильтрации (что увеличивает производительность фильтра), снизить удельные расходы реагентов на регенерацию [45]. Возможность полной автоматизация работы фильтров является одним из существенных преимуществ их применения [46]. Конструкции фильтров также позволяют производить послойную загрузку ионообменными смолами с высоко- и низкофункциональными группами. Согласно статистическим данным [47], приведенным на рисунке 1.1, основную долю отечественного рынка ионообменных смол занимают импортные поставщики. Доля российских производителей в общем объеме с каждым годом снижается. Зарубежные производители предлагают материалы, обладающие хорошими эксплуатационными параметрами: высокая рабочая обменная емкость, стабильные отмывочные характеристики.

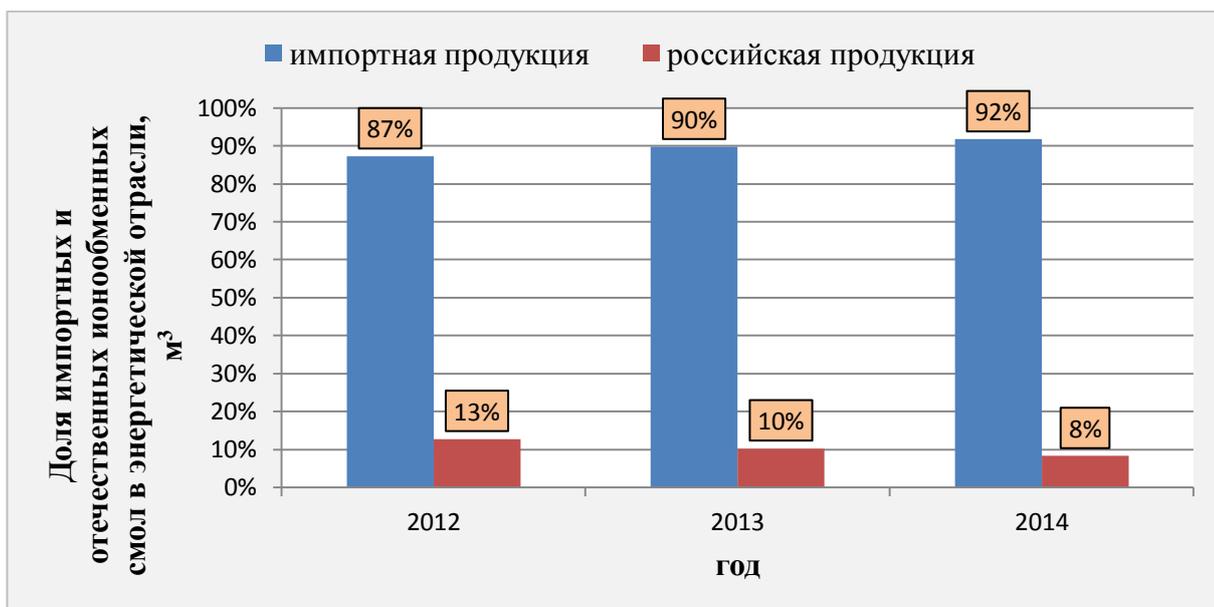


Рисунок 1.1. Структура российского рынка ионообменных смол за период 2012-2014 гг.

Технология ионного обмена, применяемая для обессоливания воды, получила широкое распространение и достаточную степень проработки и развития. Дальнейшее совершенствование этого метода возможно путем модификаций существующих методов и способов организации потоков, а также создания инновационных, более новых и совершенных ионообменных материалов.

1.2.2. Анализ применения термического метода обессоливания

Дистилляционный метод основан на способности воды при нагревании испаряться и распадаться на пресный пар и соленый рассол. По сравнению с химическим обессоливанием, термическое отличается меньшим количеством высокоминерализованных регенерационных стоков, меньшим расходом воды на собственные нужды [48]. Однако, имеет более высокие капитальные затраты. Но, несмотря на это, в целях снижения и сокращения вредных выбросов в окружающую атмосферу, на многих электростанциях применяется именно этот метод [49].

Важнейшим преимуществом данного метода являются минимальные количества используемых реагентов и объем отходов, которые могут быть

получены в виде твердых солей. Тепловая и экономическая эффективность метода определяется режимом испарения и степенью рекуперации тепла фазового перехода при конденсации пара. По характеру использования дистилляционные установки подразделяются на одноступенчатые, многоступенчатые (вторичный пар предыдущей ступени является греющим паром для последующей) и термокомпрессионные. Преимущество многоступенчатых установок в том, что на единицу первичного пара можно получить большее количество обессоленной воды. Применяют испарители как поверхностного типа, так и мгновенного вскипания. Последний тип нашел наиболее широкое распространение. Однако, выбор количества ступеней испарения и типа применяемого испарителя определяется расчетами.

Наибольший интерес представляет использование выпарных установок в сочетании с ионообменными и реагентными схемами. В этих условиях возможно оптимизировать расход реагентов, тепла и решить как экономические, так и экологические проблемы. Создание термических водоподготовительных установок для природных и сбросных вод позволяет наиболее просто решать проблему водопользования на ТЭС с ограниченным сбросом сточных вод [50, 51].

Также следует отметить, что испарительные установки применяются для подготовки добавочной воды на АЭС. Они используются и на спецводоочистках для очистки продувочной воды первого контура, радиоактивных вод бассейнов выдержки ТВЭЛов, сбросных вод, а также вод санпропускника. На одноконтурных АЭС применяются для получения пара, необходимого для уплотнения турбины и как рабочее тело эжекторных установок [38].

Для очистки радиоактивных промывочных вод применяют одноступенчатые установки. Для очистки продувочных вод первого контура применяют многоступенчатые установки.

При высоких значениях невозврата конденсата от потребителей вторичный пар испарителя используется для целей теплоснабжения, что позволяет сохранять конденсат для котлов. Для поддержания необходимого уровня солесодержания в упариваемой воде применяется периодическая продувка испарителей [52].

В процессе работы эти аппараты подвержены образованию накипи на греющих элементах испарителей. Что приводит к снижению теплопередачи, производительности и ухудшению работы установки. Поэтому в процессе эксплуатации должны быть приняты меры по удалению или предупреждению образования отложений [53]. Содержание в исходной воде органических веществ тормозит процесс кристаллизации шлама, что снижает эффект термического метода [54].

Для этого перед подачей на испаритель необходимо применять реагентные или безреагентные методы. К методам борьбы с отложениями и предотвращения образования накипи относятся:

- реагентное умягчение (например, содоизвесткование);
- умягчение на ионитных фильтрах (например, Натрионирование);
- ингибирование.

Преимуществами термического обессоливания воды можно считать:

1. Простоту технологии и отсутствие особо сложного оборудования;
2. Качественное обессоливание воды с любой концентрацией солей;
3. Отсутствие как таковых отходов (на выходе мы имеет осадок солей);
4. Отсутствие химических реагентов, которые доставляют много проблем с хранением и применением;
5. Получение обессоленной воды, соответствующей нормативным требованиям к подпитке котлов давлением до 140 атм.

Опыт эксплуатации термических водоподготовительных установок на Саранской ТЭЦ-2, Казанской ТЭЦ-3, Ленэнерго ТЭЦ-7, Сургутской ГРЭС-1 показывает их высокую надежность, экономическую и экологическую эффективность [55, 56]. Также стоит отметить, что комбинация водоподготовительных установок с установками по переработке сточных вод позволяет наиболее эффективно решать задачу минимального водопотребления и водоотведения.

Исследования показали, что в испарителях мгновенного вскипания и пленочных испарителях для ограничения накипеобразования требуется комбинированная технология коррекционной обработки воды антинакипинами с «мягким» подкислением [57, 58].

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

1.2.3. Анализ применения и внедрения мембранных технологий

Значимым событием в развитии водоподготовки для энергетики и крупной промышленности является внедрение технологий, которые оказывают минимально возможное негативное влияние на экологическую обстановку (снижают выбросы и загрязнения окружающей природы), но в то же самое время демонстрируют высокую эффективность. Такой технологией можно назвать мембранные методы. Часто встречающиеся установки обратного осмоса постепенно находят применение не только в водоподготовке для ТЭС, но и в других областях производства, а также в очистке сточных вод [59].

Анализ внедрения установок обратного осмоса, проведенный на станциях московского региона показал, что за последние годы темпы роста водоподготовительных установок на их основе увеличиваются. Результаты анализа приведены в таблице 1.1. На одних станциях установки обратного

осмоса применяются для подпитки вновь построенных блоков ПГУ, на других станциях часть такого оборудования была введена при реконструкции существующих обессоливающих систем. Стоит отметить, что в планах развития энергетической отрасли сохранится тенденция проектирования и внедрения технологии обратного осмоса.

Таблица 1.1

Анализ внедрения установок обратного осмоса на ТЭЦ московского региона

Название	Адрес	Установленное оборудование (УОО)	Планируемое внедрение (УОО)
ГЭС-1 им. П.Г. Смидовича	115035, г. Москва, ул. Садовническая, д.11	–	–
ГРЭС-3 им. Р.Э. Классона	142530, Московская обл., г. Электрогорск	–	–
ТЭЦ-8	109316, г. Москва, Остаповский пр-д, д. 1	–	3 установки обратного осмоса
ТЭЦ-9	109280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 12, корп. 1	производительность 120 (140)м ³ /ч	–
ТЭЦ-11 им. М.Я. Уфаева	111024, г. Москва, шоссе Энтузиастов, д. 32	–	4 установки обратного осмоса
ТЭЦ-12	123995, г. Москва, Бережковская наб., д.16	производительность 400 м ³ /ч (4х100 м ³ /ч)	–
ТЭЦ-16	123298, г. Москва, ул. 3-я Хорошевская, д. 14	производительность 120 м ³ /ч (3х40 м ³ /ч)	–
		производительность дожимного блока 30 м ³ /ч	
ТЭЦ-17	142800, Московская обл., г. Ступино, ул. Фрунзе, д.19	–	–
ТЭЦ-20	117312, г. Москва,	производительность	–

Название	Адрес	Установленное оборудование (УОО)	Планируемое внедрение (УОО)
	ул. Вавилова, д. 13	160 м ³ /ч (4х40 м ³ /ч)	
ТЭЦ-21	125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 9	производительность 300 м ³ /ч (5х60 м ³ /ч)	–
ТЭЦ-22	140091, Московская обл., г. Дзержинский, ул. Энергетиков, д. 5	производительность 480 м ³ /ч (8х60 м ³ /ч)	–
ТЭЦ-23	107497, г. Москва, ул. Монтажная, д.1/4	производительность 50 м ³ /ч	–
ТЭЦ-25	119530, г. Москва, ул. Генерала Дорохова, д. 16	–	5 установок обратного осмоса
ТЭЦ-26	117403, г. Москва, ул. Востряковский пр-д, д. 10	–	2 установки обратного осмоса
ТЭЦ-27	141031, Московская обл., Мытищинский р-н, д. Челобитьево	–	1 установка обратного осмоса
ТЭЦ-МЭИ	111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17	производительность 4 м ³ /ч (2х2 м ³ /ч)	–
ТЭС Москва-Сити	Москва, 2-я Магистральная ул., д.5А, стр.5	производительность 80 м ³ /ч (50 + 30)	–

Как показало исследование, проведенное в целях определения тенденций развития отрасли промышленной водоподготовки, с каждым годом спрос на поставки ионообменных материалов снижается. В свою очередь, наблюдается интенсивный рост потребления обратноосмотических мембранных элементов. Тем самым, мы видим неуклонную тенденцию развития рынка мембранных технологий. Результаты исследований представлены на рисунке 1.2.

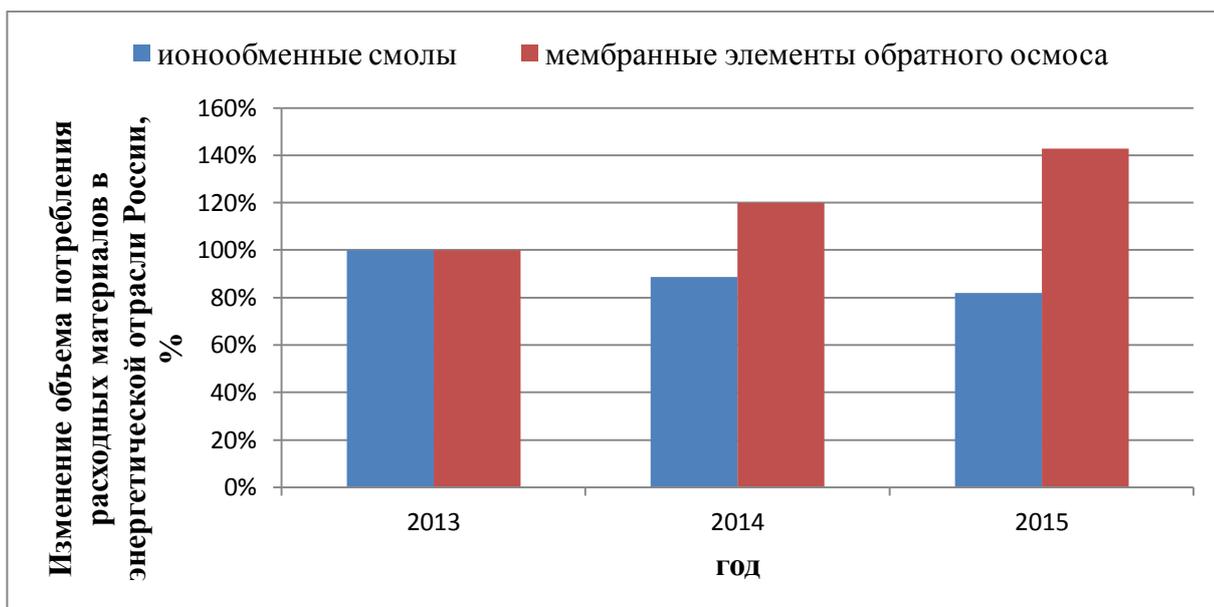


Рисунок 1.2. Динамика изменения объемов рынка обратноосмотических мембран и ионообменных смол в России за период 2013-2015 гг.

Из представленного графика видно, что наблюдается снижение спроса на ионообменные материалы с каждым годом, а потребности в мембранных элементах возрастает в среднем на 20%. Согласно прогнозным данным, ожидается стабилизация или сокращение объема рынка ионообменных смол в дальнейшем. В свою очередь динамика рынка мембранных элементов будет продолжать рост. Это связано, в первую очередь, с увеличением количества строящихся энергетических блоков, которые, в основном, применяют баромембранные методы водоподготовки.

Прогнозируемые данные говорят о том, что, несмотря на тяжелую экономическую ситуацию, инвестиции в промышленное производство, а особенно, в энергетику, будут вкладываться, и, соответственно, потребительский спрос на мембранную продукцию будет расти. По данным, полученным от ведущего российского производителя мембранных элементов компании «РМ Нанотех», будет продолжаться наращивание объемов производства. Планируемые темпы роста продаж в России составляют до 20%, и что немаловажно, до 50% будет приходиться на долю импорта продукции зарубеж.

Внедрение механизма обессоливания обратным осмосом стало возможным благодаря многочисленным исследованиям и разработкам отечественных и зарубежных ученых. Одним из основоположников теории обратного осмоса был Вант-Гофф, труды которого дали развитие его последователям. В итоге, основные принципы метода обратного осмоса были сформулированы по результатам исследований Рейда. Он доказал, что для получения очищенной воды из соленого раствора необходимо приложить к системе давление, превышающее осмотическое. Настоящий же прогресс в развитии метода стал возможен только после создания ассиметричных мембран.

В 1985 году вышло постановление Совета Министров СССР, направленное на ускорение развития мембранных технологий в народном хозяйстве, было организовано ознакомление с опытом ведущих мировых фирм в области использования обратноосмотической технологии на объектах энергетики [60, 61]. Было организовано производство мембранных элементов, разработаны и апробированы расчетные методики. Созданы и испытаны первые установки обратного осмоса (УОО).

Научные основы расчета и проектирования обратноосмотических установок изложены в работах Ю.И. Дытнерского, Ф.Н. Карелина, М. Мулдера [21, 62-63].

Первая промышленная отечественная установка была изготовлена для Зуевской ТЭЦ. Производительность ее составляла $50 \text{ м}^3/\text{ч}$. Отметим, что установка была собрана полностью из отечественных комплектующих и, что особенно важно, находилась в промышленной эксплуатации долгое время [64]. Именно создание этой установки подтвердило правильный подход и верность выбранных решений для создания и проектирования аналогичного оборудования. Вторая установка была спроектирована для ТЭЦ-23 Мосэнерго, внешний вид которой представлен на рисунке 1.3 [65]. После чего наступила эпоха внедрения обратного осмоса в механизмы водоподготовки.



Рисунок 1.3. Внешний вид промышленной установки обратного осмоса, установленной на ТЭЦ-23 Мосэнерго

По сравнению с другими технологиями мембранные методы имеют следующие преимущества:

- компактность оборудования;
- отсутствие постоянных минерализованных стоков;
- стабильное качество очистки;
- исключение применения концентрированных реагентов;
- отсутствие фазовых переходов при разделении раствора позволяет минимизировать расходы энергии;
- процесс непрерывный (за исключением процедуры

регламентной химической мойки);

- возможность получения воды высокого качества путем применения двухступенчатого обратного осмоса без финишного химического дообессоливания;
- организация малоотходной схемы путем повторного использования концентрата;
- высокая степень автоматизации.

Из вышеприведенных формулировок видно, задача обеспечения экологичности процесса достигается отсутствием высокоминерализованных сточных вод. Однако, данный способ имеет ряд недостатков:

- в задачах получения глубокообессоленной воды ($\chi \leq 0,5$ мкСм/см) возникает необходимость применения химического (ФСД или Н-ОН-ионирования) или электрохимического обессоливания (электродеионизация);
- высокие требования к качеству воды, подаваемой на УОО (необходимость осуществления качественной предочистки; ультрафильтрация, умягчение);
- большие расходы воды на собственные нужды $\approx 25\%$ (установки обратного осмоса первой ступени);
- использование зарубежных комплектующих (следовательно, высокая стоимость оборудования);
- низкий уровень эксплуатации;
- высокая чувствительность мембран к загрязнениям;
- ограниченный температурный интервал применения (5-35°C).

Стоит отметить, что на начальном этапе внедрение УОО проходило путем замены ионообменных фильтров первой ступени обессоливания. Это позволило повысить эффективность работы последующих ступеней ионообменного фильтрования, снизить расходы реагентов на регенерацию, уменьшить нагрузку по органическим соединениям. В процессе эксплуатации были выявлены проблемы, связанные с качеством воды, поступающей на УОО: оно было низким, что приводило к частым химическим мойкам. В связи с этим возникала необходимость организации качественной предочистки. Многолетний опыт эксплуатации и исследований показали, что наиболее оптимальной, с точки зрения приведения исходной воды к требуемым показателям воды, поступающей на УОО, является ультрафильтрация. Она обеспечивает снижение таких показателей как железо, алюминий, взвешенные вещества, вирусы и бактерии, низкомолекулярная органика.

Практика показала, что внедрение интегрированных мембранных технологий в отечественную индустрию позволит создать безреагентные,

ресурсосберегающие, энергоэффективные и экологически безопасные методы обессоливания. Благодаря их применению можно решать задачу создания безотходных схем с повторным использованием сточных вод.

1.3. Тенденция развития и совершенствования технологий водоподготовки

В настоящее время необходимость совершенствования технологий возрастает с ростом требований к ресурсосбережению, снижению нагрузки на окружающую среду. Тенденция снижения себестоимости продукта возможна путем снижения реальных затрат на его производство. При получении обессоленной воды на ВПУ для достижения оптимальных эксплуатационных затрат необходимо не только сокращать потребление реагентов, но и соблюдать культуру производства. Добиться всего этого возможно путем качественного подхода к проектированию и выполнения ряда требований к созданию современных ВПУ.

Сформулируем основные требования к современным установкам водоподготовки в целом:

- рациональное водопотребление;
- сокращение потребления реагентов (переход на безреагентные методы обработки воды);
- снижение нагрузки на окружающую среду путем минимизации сбросов сточных вод;
- внедрение замкнутых циклов и технологических схем переработки и повторного использования сточных вод;
- использование продувок систем оборотного охлаждения в качестве исходной воды для ВПУ;
- тщательный контроль за качеством добавочной воды;
- снижение энергетических затрат;
- высокий уровень автоматизации;
- повышение требований к качеству очищаемой воды;

- возможность обеспечения наилучшего качества воды при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

В настоящий момент невозможно комплексное выполнение всех вышеприведенных требований. Поэтому, для решения поставленных задач необходимо определить основные недостатки существующих схем с целью их дальнейшего совершенствования.

Выделим основные проблемы существующих водоподготовительных установок:

- значительное потребление воды на собственные нужды (особенно актуально для УОО первой ступени);
- применение химических реагентов (регенерация ионообменных смол);
- высокий процент использования устаревшего и требующего ремонта и реконструкции оборудования (ионообменные фильтры);
- работа оборудования со сниженными нагрузками ввиду невозможности обеспечения требуемой степени очистки при номинальной производительности (осветлители);
- высокое энергопотребление;
- при регенерации ионитов образуется большое количество высокоминерализованных стоков;
- установки занимают достаточно большие площади;
- оборудование и реагентное хозяйство требуют постоянного обслуживания квалифицированным персоналом;
- отсутствие схем с повторным использованием сточных вод;
- высокий процент применения дорогостоящих зарубежных комплектующих и оборудования при создании новых ВПУ (отсутствие качественных отечественных производителей комплектующих);
- отсутствие качественного сервисного обслуживания и недостаточное выделение средств на ремонт и реконструкцию оборудования;

- низкий уровень эксплуатации;
- высокие затраты на замену расходных материалов и приобретение реагентов.

Стоит выделить труды многих исследователей, ученых и инженеров в поиске путей оптимизации и совершенствования технологий водоподготовки. Выделим ключевые методы:

- применение противоточных технологий при создании и реконструкции ионообменных схем;
- повторное использование регенерационных растворов для регенерации ионообменных фильтров;
- применение испарителей для создания малоотходных схем ВПУ с утилизацией или сокращением сточных вод;
- применение реагентных методов осаждения с целью сокращения количества сбрасываемых отходов и организации повторного использования частично-очищенных сточных вод;
- применение мембранных методов с целью сокращения сбросов высокоминерализованных сточных вод и использования реагентов;
- применение автоматизации процессов работы оборудования ВПУ (в основном, на новом оборудовании);
- применение комплектующих и материалов отечественного производства;
- создание схем с повторным использованием сточных вод на основе установок обратного осмоса или комбинированных схем (например, проект схемы с «нулевым сбросом» Омской ТЭЦ-3);
- использование концентрата установок обратного осмоса для подпитки теплосети.

Известно, что существует огромное количество проблем, требующих решения. Во многих случаях удается добиваться хороших результатов,

однако задача выбора оптимального режима работы схемы с учетом всех требований еще не решена.

1.3.1. Пути модернизации ВПУ на основе обратноосмотических установок

Перед нами стоит задача не только сохранения положительных аспектов технологии обратного осмоса, но и максимальной оптимизации процесса. Совершенствование рассматриваемого метода обессоливания требует предварительного анализа возможных путей развития [66]. Следует выделить основные перспективные способы совершенствования, модернизации и роста привлекательности обратноосмотических установок:

- снижение энергопотребления;
- повышение качества очистки на установке путем повышения селективности мембран;
- повышение устойчивости мембран к отравлению и загрязнению, снижение влияния концентрационной поляризации (отказ от использования ингибиторов);
- снижение требований к воде, поступающей на мембрану (сокращение количества ступеней оборудования подготовки);
- повышение допустимого КПД (удельного съема с поверхности мембраны);
- организация переменных режимов работы установки без ухудшения характеристик во времени;
- организация работы установки в широком диапазоне нагрузок;
- снижение стоимости оборудования при появлении на отечественном рынке качественных производителей комплектующих.

Отсюда следует вывод, что к созданию и выбору оптимальной технологической схемы ВПУ необходим индивидуальный подход для каждого единичного случая (не бывает одинаковых решений). А определение оптимальных режимов работы установок обратного осмоса для разных

случаев должен проводиться на основе оптимизационных исследований [67-69]. Как известно, одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации УОО, остается обеспечение их длительной работы с минимальным снижением производительности, которое является результатом концентрирования и выпадения на поверхности мембраны примесей и отложений [70]. Сопоставление качества фильтрата обратноосмотической установки с аналогичными показателями традиционных ионообменных обессоливающих установок показывает, что фильтрат УОО существенно превосходит фильтрат после первой ступени ионообменных фильтров, но уступает фильтрату второй ступени. Отметим, что метод обратного осмоса может применяться так же для подготовки воды для первичного заполнения циркуляционных контуров АЭС, а также для восполнения потерь пара и турбинного конденсата [71].

В литературе [72] разработана методика, позволяющая определять и прогнозировать скорости образования кристаллических осадков в мембранных аппаратах и изменение их производительности со временем в зависимости от качества исходной воды и режимов работы мембранной установки.

В многочисленных работах подчеркивается необходимость сокращения расхода воды на собственные нужды [73-74]. Один из таких способов заключается в использовании перед УОО наночистоты. В результате, съем с обратноосмотического мембранного элемента позволяет достигать 80-90%, что существенным образом позволяет экономить воду. Авторы разработки подчеркивают, что на УОО рекомендуется применять МЭ с открытым каналом, поскольку это позволит снизить риск образования застойных зон, и, следовательно, снизить скорость образования осадков, повысить выход фильтрата [75].

Дальнейшее изучение данного вопроса позволило разработать технологию утилизации концентрата, суть которой заключается в осаждении избыточных солей жесткости, содержащихся в концентрате, на «затравке», и

дальнейшем смешении с фильтратом. При этом, получается вода, имеющая меньшее солесодержание и жесткость на величину, эквивалентную количеству выпавшего осадка на «затравке» карбоната кальция [76].

Стоит отметить важность совершенствования селективных свойств мембран и определения оптимальных условий при разделении воды на ней. Работа, проведенная В.И. Федоренко, показала, что селективные свойства полиамидных мембран определяются поверхностным зарядом, величина и полярность которого зависят от рН [77]. В изоэлектрической точке мембрана не обладает поверхностным зарядом, т.е. изоэлектронейтральна. При рН, близком к 7, полиамидные мембраны заряжены отрицательно. Чем выше рН водного раствора и плотность карбоксильных групп в поверхностном слое мембраны, тем выше ее селективность по слабодиссоциирующим органическим соединениям, соединениям кремния и бора.

Зарубежными исследователями были предложены инновации в проведении процесса химической очистки мембран УОО, выведены основные параметры, определяющие загрязнение мембраны [78]. Исследована методика поиска и приведен опыт замены мембран. Определены характерные показатели, по которым происходил выбор. Предложены способы оптимизации замены и увеличения ресурса мембран [79].

Применение интегрированных мембранных технологий (ИМТ) в сочетании с ионным обменом (прежде всего, основанном на методах противоточной регенерации) для целей водоподготовки в энергетике позволяет добиться снижения себестоимости получения обессоленной воды при одновременном сокращении водопотребления и количества солей, поступающих в окружающую среду со сточными водами. Впервые в практике отечественной теплоэнергетики установки с применением ИМТ запущены на Ноябрьской ПГЭС, Первомайской ТЭЦ.

Описаны случаи проектирования и внедрения дополнительной стадии обработки концентрата осмоса первой ступени на «дожимной» или

«концентратной» УОО, благодаря которому показатель потребления воды на собственные нужды снижался до 5% [80].

Наиболее целесообразно применение комбинированных схем ВПУ, представляющих ряд различных способов обработки воды, объединенных в общую технологическую схему, отдельные элементы которой подключают для частичной или полной обработки исходной воды в соответствии с тепловым графиком [81].

Комбинация методов позволяет достигнуть оптимальных показателей качества, надежности, эффективности и экономичности эксплуатации [82-83]. Несомненно, в совокупности, достоинства каждого метода при их сочетании позволяют существенным образом снизить или сгладить недостатки.

1.4. Анализ методов моделирования и проектирования установок обратного осмоса

Совершенствование технологий водоподготовки невозможно представить без качественного проектирования. Нормативная база была создана еще в советские времена и формировалась на применении ионного обмена как основного метода обессоливания воды для подпитки котлов ТЭС (ВНТП 81). К настоящему моменту основополагающего руководящего документа по проектированию схем водоподготовки на базе мембранных методов нет, имеется лишь единичные документы СТО «Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Нормы и требования», разработанный ВТИ для НП «ИНВЭЛ» и введенный в 2009 году [84]. Требования указанного документа направлены на создание высокоэффективных, надежных и безопасных водоподготовительных установок, в том числе, на основе мембранных технологий.

Отсутствие должного опыта в создании, проектировании и реализации схем водоподготовки с мембранными технологиями приводило к принятию

ряда ошибочных решений. К настоящему времени, в России сформировалась база организаций, имеющих достаточный опыт и необходимые знания для проектирования водоподготовительных установок, полагающихся на мембранные методы очистки. Появляется необходимость создания эффективных схем водоподготовки, которые бы обеспечивали минимальные капитальные и эксплуатационные затраты, но в то же время решали бы поставленные перед ними технические задачи по получения воды требуемого качества [26, 85-86]. С целью выполнения этой задачи и снижения вероятности ошибки при проектировании требуется использование качественного способа моделирования процесса и механизма подбора установок обратного осмоса [87]. На данный момент производители мембранных элементов предлагают для проведения расчетов при проектировании установок свои компьютерные программы. Известно, что УОО это динамическая система, рабочие характеристики которой изменяются во времени достаточно быстро [88]. А при проведении расчетного моделирования значения всех задаваемых параметров системы постоянны. Из этого следует вывод о невозможности выполнения тщательного расчета установки ввиду многообразия изменяющихся показателей и условий. Компьютерное моделирование может дать лишь оценку возможности применения установки обратного осмоса, определить проектную компоновку мембранных корпусов, показать влияние определенного типа загрязнителя на вероятность образования отложений.

Альтернативный способ моделирования и проектирования заключается в проведении пилотных испытаний установок обратного осмоса в условиях реального объекта. Под данным термином подразумевается исследование, предназначенное для получения предварительных данных, необходимых для дальнейших этапов проектирования и создания УОО. Проведение пилотных испытаний позволит максимально гарантировать правильность работы схемы. Они помогут избежать ошибок в подборе оборудования. Таким образом, происходит испытание работоспособности системы в реальных

условиях. Данные, полученные после проведения пилотных испытаний, дают четкое представление о работе установок и позволяют достаточно точно смоделировать конструкцию рабочей схемы как самой УОО, так и всей системы водоподготовки в целом. Результаты, полученные по итогам выполнения пилотных испытаний, помогают определить:

- оптимальные параметры (физические, гидравлические, химические) и режимы работы установки;
- тип используемых мембранных элементов (в зависимости от качества исходной воды и требований к очищенной);
- возможность получения максимальной степени очистки при различных вариантах предподготовки;
- фильтроцикл или периодичность проведения химических моек;
- возможность применения различных моющих химических растворов;
- тип используемых реагентов и их оптимальные дозы (при необходимости);
- режимы рециркуляции (при необходимости).

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что целесообразность использования той или иной конфигурации установки обратного осмоса зависит от целей и задач, поставленных перед проведением пилотных испытаний. В случае испытаний установки для проектирования ВПУ на ТЭС проведение ПИ призвано определить:

- допустимые степени концентрирования, связанные с качеством исходной воды;
- проектные параметры работы УОО;
- технологии очистки и периодичность их проведения.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПИЛОТНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА

2.1. Особенности работы установок обратного осмоса

Как известно, одним из основных преимуществ технологии обратного осмоса является получение стабильного качества фильтрата при достаточно широком изменении физико-химических параметров исходной воды [89]. Однако, стоит отметить, что добиться нужного результата возможно при соблюдении ряда требований, как в процессе проектирования, так и при эксплуатации оборудования.

Правильный выбор оборудования, а в дальнейшем, и контроль рабочих параметров в процессе эксплуатации, соблюдение режимов управления и сервисных интервалов, позволят обеспечить длительную работу в безаварийном режиме [90]. Очень важно, при проектировании и расчете установок, учитывать ряд существующих требований, факторов и условий, от которых зависят основные показатели работы УОО, а именно:

- Удельная производительность мембран и ее зависимость от предполагаемых рабочих параметров;
- Селективность по различным компонентам исходной воды и их зависимости от предполагаемых рабочих параметров;
- Качество пермеата (электропроводность, а так же анализ ключевых показателей качества) и изменение его в течение эксплуатации;
- Динамические характеристики гидравлических параметров (перепад давлений и распределение потоков по корпусам, скорость потока над мембраной и т.д.).

Важное значение имеет чувствительность мембранного элемента к воздействию различных загрязнителей, которые определяют динамику отложений, а также технология химической очистки от загрязнений, которая обеспечивает длительную и эффективную работу УОО. Основная задача

технологии обратного осмоса состоит в удалении растворенных солей, другие загрязнители должны быть удалены на предшествующих стадиях очистки [91]. Их наличие снижает эффективность работы УОО, поэтому необходимо соблюдать ряд требований к качеству воды, поступающей на установку, приведенных в таблице 2.1. Конструкция и материалы, из которых изготавливают мембранные элементы, накладывают ограничения на температурный диапазон (5-35°C) и pH (3-10) исходной воды.

Таблица 2.1

Требования к воде, поступающей на установки обратного осмоса

Показатель	Значение
Марганец	не более 50 мкг/л
Алюминий	не более 50 мкг/л
Железо	не более 50 мкг/л
Свободный хлор	не более 0,1 мг/л
Мутность	1 ЕМФ
Коллоидный индекс SDI	≤ 3

Также должны быть выполнены мероприятия, обеспечивающие предотвращение отложения солей жесткости на поверхности мембраны. С целью достижения требуемых значений, перед УОО необходимо использовать систему предварительной очистки. Ее конфигурации могут варьироваться и иметь в своем наборе различные виды и группы оборудования, которые существенно зависят от источника водоснабжения и качества исходной воды. Корректно подобранная предподготовка позволит избежать проблем и обеспечить устойчивость в работе УОО, предотвратить аварийные остановки оборудования. Однако, обеспечить вышеуказанные условия во многих случаях не удастся или невозможно. В этих обстоятельствах необходимы специальные исследования и разработки для создания обратноосмотической системы, которая должна обеспечить требуемые проектные и эксплуатационные параметры.

2.2. Технологическое проектирование. Особенности, требования и ограничения

Выбор схемы и оборудования для приготовления добавочной воды для подпитки котлов ТЭС выполняется в рамках технологического проектирования согласно требованиям соответствующих нормативов [92]. Основные технические решения должны приниматься с учетом обеспечения качественной и надежной эксплуатации системы, минимальных материальных затрат на оборудование и эксплуатацию, а также защиты окружающей среды от ее негативного влияния.

Выработка проектно-технических решений зависит от постановки задачи, которой может быть:

- Новое строительство;
- Реконструкция и модернизация существующей системы;
- Расширение (уменьшение) системы водоподготовки.

В ходе технологического проектирования приходится решать ряд задач:

- Обеспечение оптимальных и максимально эффективных технологических и технических параметров продукта;
- Минимизация капитальных и эксплуатационных затрат;
- Развитие технологии и совершенствование линейки оборудования.

Для эффективного решения поставленных задач и качественного выполнения работ необходимо следовать определенным правилам и рекомендациям.

Для начала необходимо сформулировать исходные требования, определить техническое задание по объему и качеству продукта, определить исходное качество воды (что не всегда является простой задачей).

Рассмотрим три случая, возможные при определении исходного качества воды:

1. Действующее предприятие, существующий водозаборный узел и все параметры хорошо определены;
2. Действующее предприятие и исходные параметры определены плохо.

В этом случае, необходимо проведение изыскательских работ по сбору исходных данных и детальному изучению пиковых выбросов (примеры: НАК АЗОТ, Рос. ЗМУ, ТЭЦ-12 Мосэнерго);

3. Параметры достоверно неизвестны:

- Муниципальный источник;
- Водооборотные циклы предприятий;
- Очистные сооружения.

Для последнего случая методами решения проблемы может быть изучение опыта других аналогичных предприятий или лабораторно-пилотное моделирование.

В техническом задании очень важно указать возможный разброс физико-химических параметров. Возможны различные варианты, например, широкий температурный разброс от 0°C до 35°C (это характерно для муниципальной водоподготовки и опреснительных установок). Может наблюдаться широкий разброс солесодержания (очистка стоков, ВЗУ в зонах смешения речной и морской воды, например ЛАЭС-2). В этом случае необходимо выдать техническое задание на работу оборудования с переменными параметрами. Тем самым, должна обеспечиваться гибкость системы [93].

При проектировании систем водоподготовки необходимо учесть следующие особенности технологий:

- Качество очистки меняется в течении фильтроцикла;
- Имеет место снижение «усредненного качества очистки» (деградация) после проведения регенераций;
- Имеется тенденция к возникновению протечек;

- Меняется (как правило, ухудшается) исходное состояние.

Отсюда возникает логичное требование к выбору технологии: наличие запаса прочности по коэффициенту очистки. Только учитывая особенности и ограничения различных технологий можно спроектировать надежную систему водоподготовки [126].

При использовании технологии осветления с известкованием целесообразно перед установкой обратного осмоса предусмотреть механическую фильтрацию и Na-катионирование (рисунок 2.1).

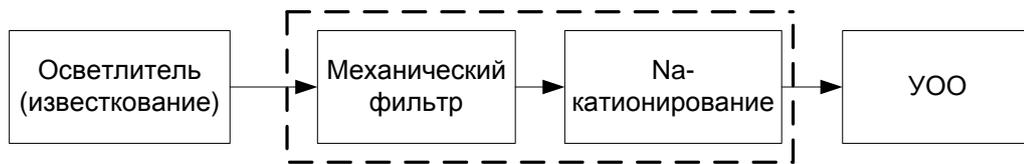


Рисунок 2.1. Технологическая схема с применением технологии осветления с известкованием

При использовании технологии ультрафильтрации, при невысокой жесткости исходной воды, кислотные промывки могут быть исключены из СЕВ (Chemical Enhanced Backwash – химически усиленная обратная промывка). Необходимо учитывать, что технология ультрафильтрации имеет ограниченную селективность по удалению органики (~50÷70%), поэтому при высоком содержании органических соединений необходимо принимать дополнительные меры – ставить фильтры с активированным углем или органопоглотители перед установками обратного осмоса (рисунок 2.2).

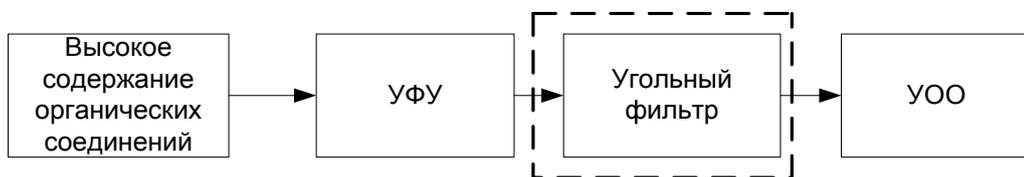


Рисунок 2.2. Технологическая схема системы водоподготовки с высоким содержанием органических соединений с установкой угольных фильтров

Если принято решение не ставить угольные фильтры или органопоглатители, то тогда необходимо предусмотреть обязательное резервирование УОО (рисунок 2.3).

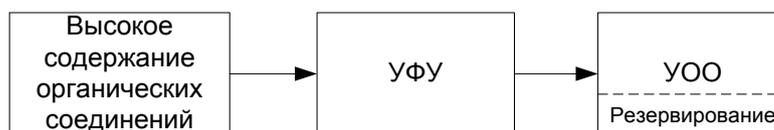


Рисунок 2.3. Технологическая схема системы водоподготовки при высоком исходном содержании органических соединений с резервированием УОО

При проектировании схем водоочистки с установками обратного осмоса надо учитывать, что указанная селективность обратноосмотических мембранных элементов ($> 99\%$) приведена по тестовому раствору NaCl. Поэтому при расчете схем водоподготовки селективность УОО по общему солесодержанию необходимо принимать $\approx 97-98\%$.

Отсюда следует рекомендация по проектированию - коэффициент очистки необходимо выбирать *не более 20* (т.е. селективность 96%), чтобы обеспечить *запас прочности*. При расчете двухступенчатых УОО – полагать качество фильтрата $2\div 3$ мксм/см (с учетом деградации мембран).

При проектировании схем обратного осмоса с электродеионизацией (ЭДИ), если нет возможности поставить двухступенчатый осмос, то вместо второй ступени УОО нужно предусмотреть Na- катионирование (рисунок 2.4) [94]. Это позволит снизить нагрузку по солям жесткости на модуль ЭДИ.

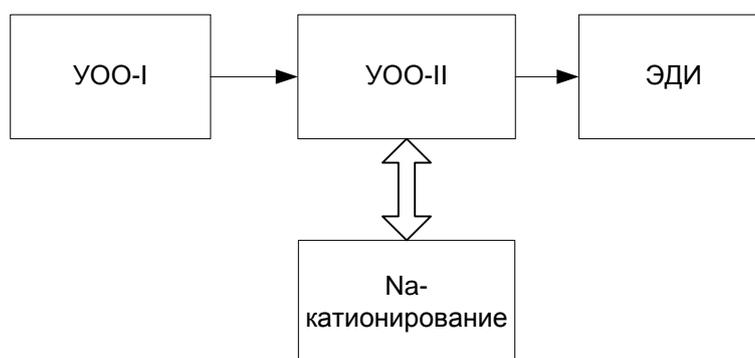


Рисунок 2.4. Технологическая схема получения глубокообессоленной воды на установке электродеионизации

Что касается рекомендаций по технологическому проектированию интегрированных мембранных технологий (рисунок 2.5), стоит выделить следующее:

- Мембранную дегазацию не применять вовсе или предусмотреть высокий уровень контроля установки мембранной дегазации;
- Не применять УФУ-С для очистки стоков с УФУ;
- Использовать отстаивание и повторную очистку на УФУ;
- УОО-С применять с должным уровнем резервирования с использованием промежуточной емкости.

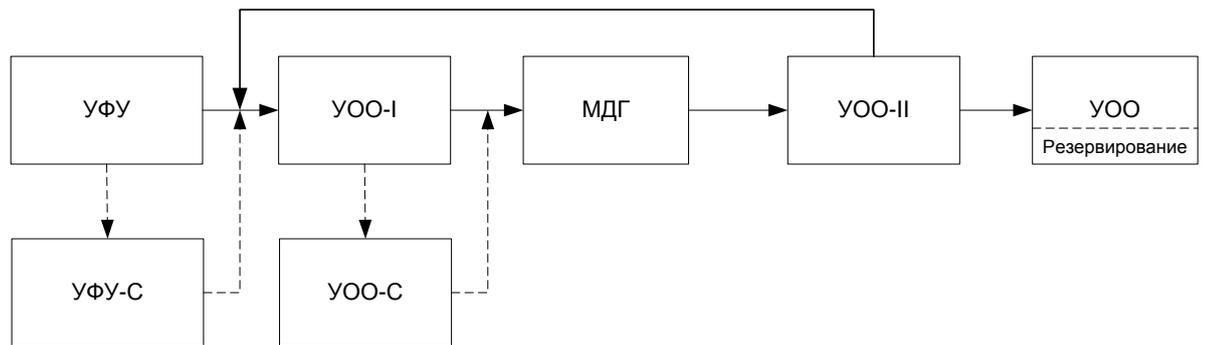


Рисунок 2.5. Технологическая схема водоподготовки, основанная на интегрированных мембранных технологиях

ИМТ без емкостей между ступенями имеют свои достоинства – относительно низкие капитальные затраты, и пониженную вероятность микробиологического обсеменения. Наряду с этим такие схемы содержат гидравлические неустойчивости. Решением данной проблемы может быть избыточная производительность УФУ и УОО-1. Основная область применения таких схем – установки водоподготовки с невысокой производительностью.

2.3. Технические параметры и характеристики мембраны

В технологии обратного осмоса промышленное применение основано на использовании мембранных элементов длиной около одного метра (40 дюймов). Диаметр промышленных мембран может быть различным: 8 или, реже, 16 дюймов. Пилотные испытания могут проводиться на мембранных элементах диаметром как 2,5 или 4 дюйма, так и 8". Выбор диаметра не принципиален, так основными техническими параметрами являются:

v – скорость потока над мембраной, м/с;

I – проницаемость мембраны, л/м²·с·Па;

J – удельная производительность, л/м²·с;

$S_{и}$ – истинная селективность мембраны, %.

Эти параметры позволяют определять технические характеристики мембранного элемента (МЭ): его селективность $S_{МЭ}$, производительность $Q_{МЭ}$. А на основании этих данных определяется селективность ($S_{у}$) и производительность ($Q_{ф}$) установки. Компьютерное моделирование основано на паспортных значениях: I , J и $S_{МЭ}$ при заданном значении v . Однако, они могут заметно отличаться от реализуемых в фактических условиях. Одним из основных параметров необходимых для проектирования УОО является рабочее давление $p_{вх}$ на входе в мембранный модуль. Оно определяется величиной трансмембранного давления Δp_m и гидравлическими потерями, степенью концентрирования (осмотическим давлением). Трансмембранное давление определяет производительность:

$$Q_{\phi} = \int J \cdot ds_M = \int I \cdot (\Delta p_m(s_M) - \pi(s_M)) \cdot ds_M \quad (2.1),$$

здесь s_M – площадь мембраны. Учитывая то, что длина поперечного сечения (то есть его ширина) мембранного блока для заданного i -го каскада постоянная величина, обозначим ее L_i . Выражение (2.1) приводится к виду:

$$Q_{\phi} = \sum_i L_i \int_0^{L_n} I \cdot (\Delta p_m(x) - \pi(x)) dx \quad (2.2),$$

где x текущая координата по длине мембранных элементов, $L_n = n \cdot l_0$, l_0 – длина мембранного элемента (обычно 40 дюймов), n – их число в высоконапорном корпусе. Здесь естественно возникает понятие обобщенного мембранного элемента $ОМЭ_n$, который имеет такой же диаметр, как и стандартный элемент, а длину в n раз больше. Тогда i -ый каскад, содержащий N_i корпусов, описывается N_i параллельно установленными $ОМЭ_n$: $N_i \times ОМЭ_n$. Значение проницаемости в расчетах является величиной постоянной, исходя из заложенных в модель программы данных и проектных

значениях качества воды рассчитывается $\pi(x)$. Однако, они могут заметно отличаться от фактических.

2.4. Пилотное моделирование установок обратного осмоса.

Рекомендации и требования к проведению пилотных испытаний

В настоящее время при проектировании установок обратного осмоса, в основном, применяется моделирование при помощи расчетных программ, которые предлагают производители мембранных элементов [95]. Анализ качества программ и достоверности получаемых результатов расчета далек от совершенства, хотя на начальной стадии проектирования без них не обойтись.

Достоверность результатов расчетных программ довольно низкая, потому что программы учитывают ограниченное число параметров и основаны на идеальных моделях. По этим причинам они не могут быть гарантированной основой для проектных решений.

Результаты, полученные с помощью таких программ, могут быть проектной основой при расчете гидравлики (значения перепадов давлений, выбор рабочих насосов, скоростей фильтрации, обратной промывки и т.д.).

В ряде простых случаев, (например, стабильное качество исходной воды, хорошо подготовленная вода) можно использовать расчетное моделирование. Но при проектировании крупных промышленных установок (производительность более 30 м³/ч), такие программы следует применять только для определения оценочных характеристик установки. Полный спектр рабочих параметров невозможно определить при компьютерном моделировании, поскольку в них не учитываются различные параметры и факторы [128].

Отметим основные проблемы проектирования УОО:

- Невозможность точного компьютерного расчета ввиду неполных данных исходной воды: возможно определить лишь диапазоны ее

параметров, при этом имеется широкий спектр их комбинаций, который имеет нестационарный характер;

- Ограниченные возможности расчетных программ (не учитывают динамики изменений селективности, концентрационной поляризации, перекосы и изменение гидродинамических потоков и т.д.);
- Сложность подбора оборудования ввиду неполноты исходных данных и конкретных требований к проектируемой системе водоподготовки;
- В расчётных программах представлен ограниченный состав растворенных химических веществ. Среди них катионы: калий, натрий, магний, кальций, аммоний, барий. Анионы обычно включают следующие вещества: хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты, фториды, нитраты, бораты;
- Проблема эффектов масштабирования (невозможность использования результатов лабораторных экспериментов для промышленных установок);
- Невозможность теоретического предсказания динамики загрязнения установок и снижения их производительности, качества фильтрата.

Ввиду этого, при проектировании систем водоподготовки на объектах с большим объемом вод со сложным составом, где требуется тщательная и подробная схема получения очищенной воды, а так же полное моделирование работы установок необходимо проведение опытно-промышленных или пилотных испытаний. Под данным термином подразумевается исследование, предназначенное для получения предварительных данных, необходимых для дальнейших этапов проектирования и создания УОО. Актуальность применения проведения пилотных испытаний в области водоподготовки можно отнести к следующим случаям:

1. При колебаниях физико-химического состава исходной воды в широком диапазоне (например, температура, солесодержание и прочее);

2. Очистка сточных вод различного характера;
3. Повторное использование промышленной технологической воды;
4. Специальные задачи водоподготовки для критических производств с использованием УОО, к ним могут относиться:
 - Получение подпиточной обессоленной воды для подпитки котлов 100 атм исключительно методом обратного осмоса (2-х ступенчатый обратный осмос),
 - Снижение расходов на собственные нужды в обратноосмотических системах путем многоступенчатого концентрирования сбросных вод («дожимные» установки обратного осмоса);
 - Работа УОО с широким изменением физико-химических параметров исходной воды.

Одним из примеров такой задачи является проектирование ВПУ для ЛАЭС-2, где источником воды предполагается Капорская губа Финского залива с колебаниями солесодержания от 650 до 5070 мг/л. Эти параметры требуют специальной конструкции УОО и соответствующей инженерно-технической проработки.

Пилотные испытания должны отражать основные технологические процессы и параметры: скорости фильтрации, скорости массопереноса, коэффициенты концентрирования, коэффициенты неоднородности, градиенты потоков, химические реакции, процессы адгезии, сорбции и гидродинамическое подобие.

Стандартным подходом к решению обозначенных задач является проведение пилотных и тестовых испытаний. Процедура внедрения новой технологии подразумевает проведение двухэтапной научно-исследовательской работы (НИОКР):

- Лабораторные исследования;
- Пилотные испытания.

Лабораторные исследования призваны определить принципиальную возможность применения технологии и возможные качественные показатели. На основе полученных данных разрабатывается модель промышленного применения. Эта модель проверяется и уточняется на опытно-промышленной или пилотной установке. Исследования на них призваны определить основные технические и технологические параметры, которые реализуются в промышленных установках.

Использование технологии обратного осмоса в задачах построения эффективных систем водоподготовки всегда должно быть основано на детальном лабораторном исследовании и пилотных испытаниях.

Проведение пилотных испытаний позволяет откорректировать результаты компьютерного моделирования и максимально оптимизировать проектную схему УОО. Они помогут избежать ошибок в подборе оборудования. Таким образом, происходит испытание работоспособности системы в реальных условиях. Данные, полученные после проведения пилотных испытаний, дают четкое представление о работе установок и позволяют достаточно точно смоделировать конструкцию рабочей схемы как самой УОО, так и всей системы водоподготовки в целом, а так же позволяют определить:

- Диапазон устойчивой работы УОО;
- Возможность получения максимальной степени очистки при различных вариантах предподготовки;
- Дополнительные требования к корректировке предподготовки;
- Оптимальные параметры (физические, гидравлические, химические) и режимы работы установки;
- Тип используемых мембранных элементов (в зависимости от качества исходной воды и требований к очищенной);
- Фильтроцикл или периодичность проведения химической очистки;

- Технологию (метод) очистки от конкретных загрязнений: возможности применения различных моющих химических растворов и их оптимальные дозы.

При этом пилотные испытания должны быть корректно проведены. Они должны быть полномасштабными, достоверными, и проведены не только в широком диапазоне параметров технического задания, но и в интервале до $\pm 25\%$ за рабочими рамками. Кроме этого, пилотные испытания должны быть выполнены для всех циклов рабочих режимов, а также должны определять тенденции к деградации фильтрующих сред и материалов.

На пути осуществления корректных пилотных испытаний существует масса субъективных проблем:

- Тенденциозность к получению желаемого результата;
- Дефицит профессиональных научных и исследовательских кадров (испытания проводят не инженеры-исследователи и научные работники, а монтажники);
- Испытания проводятся на новом оборудовании, которое не прошло испытания в организациях, не установлены достоверно его параметры, не отработано аппаратурное оформление;
- Ограничены финансовые возможности;
- Ограничены временные возможности;
- Недостаточная организационно-техническая работа потенциального предприятия-потребителя по проведению пилотных испытаний (недостаточно хорошие условия для проведения испытаний, режимные ограничения на предприятии);
- Немотивированность ключевых специалистов потребителя в пилотных испытаниях, и т.д.

Кроме этого существует ряд технико-методических проблем:

- Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации и регистрации не отвечают классу исследований (недопустимо применение индикаторов – ротаметров);
- Приборы КИПиА смонтированы некорректно (например, датчики давления установлены в зонах завихрения);
- Нет необходимых средств и оборудования для проведения химических анализов;
- Ошибки в масштабировании – исследования проводятся в лабораторном, а не промышленном масштабе.

Во избежание вышеописанных проблем, необходимо аттестовать оборудование для пилотных испытаний, аттестовать специалистов, проводящих пилотные испытания, контролировать ход выполнения работ, провести анализ качества проведенных пилотных испытаний, детально изучить не только «Выводы», но и результаты пилотных испытаний. При наличии существенных и принципиальных сомнений – провести дополнительные исследования.

Следует отметить, что проведение пилотных испытаний также находит свое применение в следующих случаях:

- Определение рабочих характеристик, показателей и эксплуатационных параметров обратноосмотического процесса;
- Моделирование и проверка работоспособности проектируемой промышленной УОО;
- Персонификация тестируемых МЭ (проверка в рабочих условиях) для определения оптимального установочного порядка в корпусе, определение свойств мембран.

Использование той или иной конфигурации установки обратного осмоса зависит от целей и задач, поставленных перед проведением пилотных испытаний. Поэтому стандартные пилотные установки могут включать несколько мембранных элементов. Выбор конструкции пилотной установки должен соответствовать моделированию процессов в промышленной

установке. Отличительной особенностью промышленных УОО является существенная рабочая длина концентрирования исходной воды вдоль линии фильтрования: 10-18м. Это реализуется применением 2-3 каскадов. Каскад состоит из нескольких параллельных корпусов высокого давления с 5-6 элементами в каждом. Полномасштабная пилотная установка должна описывать элементарную схему «ёлочки»: $2 \times \text{ОМЭ}_n - 1 \times \text{ОМЭ}_n$. «Ёлочка» образуется двумя параллельно работающими корпусами с n элементами, концентрат от которых поступает на вход третьего корпуса. ОМЭ_n – обобщенный мембранный элемент, который моделирует (обозначает) n мембранных элементов, или мембранный элемент длиной n метров. В промышленной установке отдельным базовым «кирпичиком» является ОМЭ_n . Если мы сможем описывать работу ОМЭ_n , в реальных условиях мы можем предсказать работу всей установки. Таким образом, минимальный размер пилотной мембранной установки (ПМУ) должен содержать хотя бы один ОМЭ_n . Например, для моделирования больших промышленных установок на базе корпусов высокого давления с шестью мембранными элементами, требуется ПМУ с ОМЭ_6 . Для классификации ПМУ предлагается использовать обозначение: ПМУ- α - β , где α обозначает диаметр мембранного элемента в дюймах, а β – их число. Фото ПМУ-4-6 представлено на рисунке 2.6.

С помощью этой установки проводилось моделирование применения процессов обратного осмоса для выбора технологии водоподготовки и системы очистки стоков Московского нефтеперерабатывающего завода и завода по производству минеральных удобрений «Новомосковский Азот», Череповецкая ГРЭС, ТЭЦ-22 Мосэнерго. Если пилотная установка содержит менее n элементов, она не может корректно моделировать работу промышленной установки.



Рисунок 2.6. Внешний вид пилотной мембранной установки ПМУ-4-6

Еще одним из необходимых условий создания пилотной установки является возможность менять конфигурацию и моделировать в процессе исследований как многокаскадное расположение модулей, так и многоступенчатое. На основе сформулированных требований к ПМУ может быть рекомендована гидравлическая схема, представленная на рисунок 2.7.

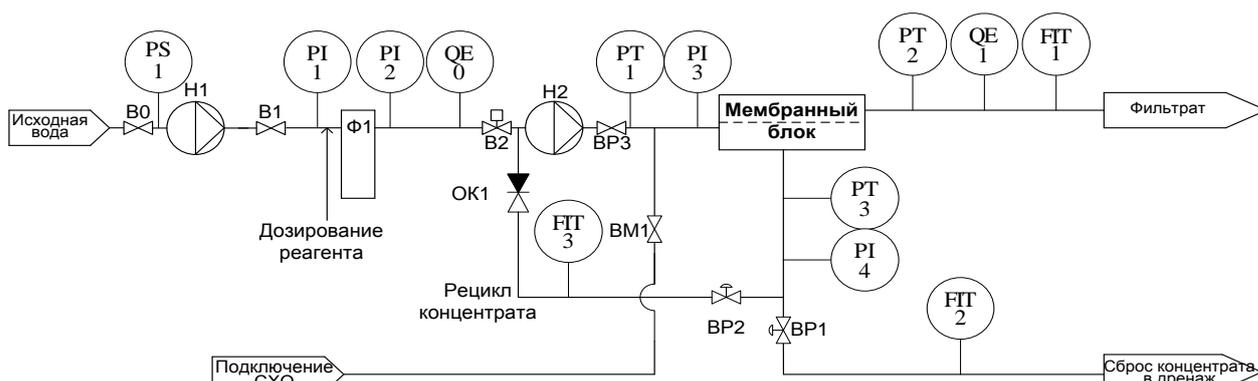


Рисунок 2.7. Гидравлическая схема пилотной обратноосмотической установки

Установка включает: Ф1 – микрофильтр; Н1 – насос подкачки; Н2 – насос повышения давления; В0 – кран входной воды; ВР1-ВР3 – регулировочный вентиль потока концентрата, рециркуляции и входного потока соответственно; ВМ1 – кран шаровой, предназначенный для

организации химической очистки мембран; ОК1 – обратный клапан потока рециркуляции; PI1, PI2 – манометры исходной воды (для контроля давления до и после микрофильтра); PS1 – реле давления; FIT1 – расходомер потока пермеата; FIT2, FIT3 – расходомер потока концентрата и рециркуляции соответственно; PT1-PT3 – датчики входного давления, давления концентрата и давления пермеата; PI3 – манометр входного давления; PI4 – манометр концентрата.

ПМУ на базе n мембранных элементов, каждый из которых находится в своем корпусе, позволяют определить текущее значение p_j давления в линии концентрата после j -го элемента ($j=1 \div n$). Также возможно определить производительность каждого элемента: поток q_j . Обозначим эти измерения как pq -процедура. Схематически она изображена на рисунок 2.8.

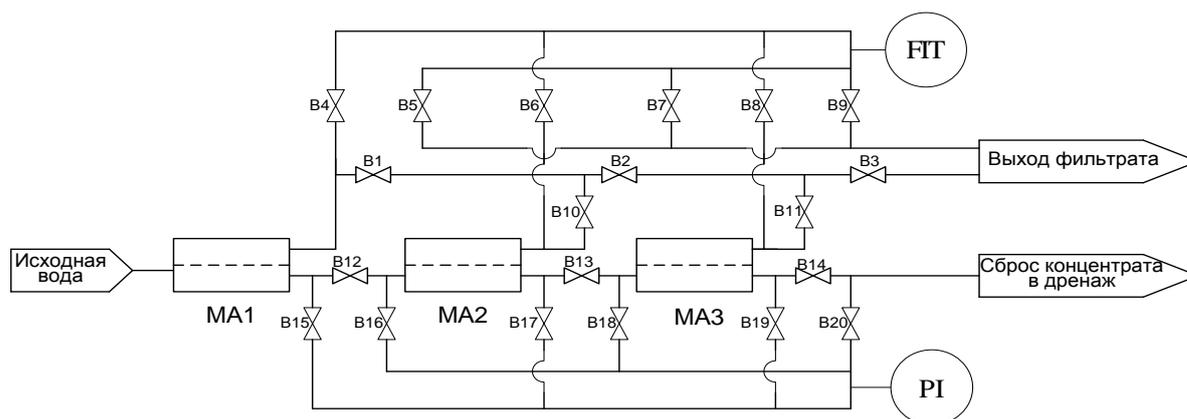


Рисунок 2.8. Схема измерения p_j давления в линии концентрата и потока фильтрата каждого элемента q_j

Простейшие пробоотборники позволяют измерять χ_j – электропроводность фильтрата на выходе каждого элемента. Соответствующее измерение можно обобщить как $pq\chi$ -процедуру. Полученные при таком измерении данные позволяют корректировать расчетные программы с введением эмпирических коэффициентов. На рисунке 2.6 (фото ПМУ-4- б) видны три манометра, предназначенные для измерения p_j . Для автоматического измерения могут быть использованы датчики давления. Для измерения q_j может быть приложена простейшая

схема с использованием быстроразъемных фитингов и недорогим расходомером.

При этом, проведение пилотных испытаний должно сопровождаться точными измерениями контролируемых параметров работы установки. Поэтому с целью контроля качества воды, следует выделить следующие требования к созданию конструкции и работе пилотных и промышленных опытных установок обратного осмоса:

1. Соблюдение оптимальных гидродинамических характеристик работы (скорость потока над мембраной, удельная производительность), минимизация местных сопротивлений между корпусами мембранных модулей (во избежание перекосов потоков по корпусам);
2. Использование пробоотборных кранов с целью постоянного контроля показателей качества исходной воды и фильтрата для каждого мембранного корпуса, а также в различных точках системы обратного осмоса;
3. Качественное измерение потоков (использование электронных расходомеров);
4. Соблюдение температурных режимов (диапазона температур, обеспечивающих поддержание стационарных параметров процесса). Например, при работе на модельных растворах по замкнутому циклу необходимо обеспечить стабильную температуру, что достигается использованием дополнительного охлаждающего оборудования;
5. Тщательный контроль перепада давления по мембранным корпусам (с целью определения степени уровня загрязнения мембран), а также на системе микрофльтрации.

На основе анализа выполненных нами пилотных испытаний могут быть сформулированы следующие рекомендации по методике их проведения:

2. Длительность проведения испытаний не менее 1 месяца. Так как первые несколько дней происходит настройка параметров работы и выход на

режим, и только потом уже круглосуточный режим работы с контролем параметров и корректировкой режимов;

3. Отработка технологии химической очистки требует выбора оптимального температурного режима, поэтому обязательным является комплектация станции химической очистки системой подогрева моющего раствора;
4. Система микрофильтрации в составе ПМУ должна иметь возможность изменять площадь фильтрации (например, использованием переменного числа фильтрующих элементов) с целью определения рекомендуемой нагрузки на площадь фильтрации в течении фильтроцикла, определением ресурса и подбором наиболее оптимального типа фильтрующих элементов.

Для соблюдения тщательного контроля рабочих параметров и показателей в процессе эксплуатации, обнаружения, выявления и предотвращения внештатных ситуаций, установки обратного осмоса оборудованы контрольно-измерительными приборами, показания которых позволяют наблюдать за режимом работы. Поэтому, очень важно соблюдать ряд требований, предъявляемых к используемым системам контроля:

- Использование только высокоточных приборов для измерения качественных показателей воды;
- Использование электронных приборов для измерения расхода;
- Контроль температуры;
- Контроль давления при использовании датчиков давления, ввиду низкой точности манометров и визуального определения значения давления;
- Контроль рН.

Следует особенно отметить, что одним из важнейших условий контроля работы УОО является точное измерение потоков. Грубейшей ошибкой, при этом, является использование поплавковых ротаметров, которые, по существу, являются индикаторами потока. Исследования, выполненные в работе по калибровке ротаметров [96], показали наличие

больших систематических ошибок в измерении потоков. В некоторых случаях, ошибка может достигать $\pm 30\%$. Важными параметрами, определяющими низкую точность ротаметров, являются:

- 1) Существенная зависимость вязкости воды от температуры (при увеличении температуры воды от 5°C до 30°C ее вязкость снижается почти вдвое);
- 2) Существенная зависимость от загрязненности ротаметра и поплавкового устройства в процессе эксплуатации;
- 3) Зависимость от конструкции поплавкового устройства, разброс в его технических характеристиках, что дает, как правило, ошибку 2-5%;
- 4) Конструктивные особенности ротаметра и ошибки его монтажа могут привести к значительной турбулизации входного потока, вследствие чего может появиться погрешность в показаниях;
- 5) Точность шкалы и визуального определения положения поплавка (погрешность 3-5%).

Эти условия, а также ряд других, не позволяют использовать ротаметры для пилотных исследований, имеющих целью определение параметров системы для дальнейшего проектирования промышленных установок. На рисунке 2.9 показаны изображения установок с использованием поплавковых ротаметров и электронных расходомеров.

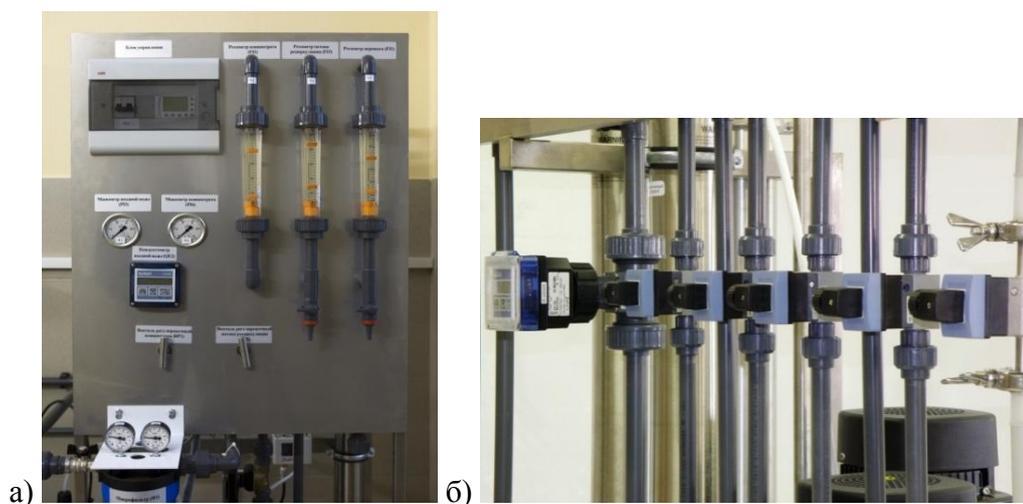


Рисунок 2.9. а) – УОО с использованием поплавковых ротаметров, б) – УОО с использованием электронных расходомеров

2.5. Экспериментальное сравнение работы тестовых и пилотных мембранных установок

При проведении пилотных испытаний технологии обратного осмоса предложено ввести два класса установок: пилотные и тестовые мембранные установки (ТМУ). На практике во многих случаях в качестве пилотных установок используются УОО с 1-2 мембранными элементами. Гидравлическая схема, этих установок не отличается от схемы, представленной на рисунке 2.7. Отметим, что эта схема содержит также линию рециркуляции, которая обычно не используется в промышленных УОО. Использование рециркуляции позволяет создать требуемый уровень концентрирования солей и смоделировать процесс очистки для заданного мембранного элемента в составе промышленной установки. Однако, как было указано выше, полномасштабного моделирования промышленной УОО эти установки не могут. В силу того, что они моделируют лишь отдельные процессы в промышленной УОО, их предлагается определять как тестовые мембранные установки (ТМУ). Их классификацию будем считать аналогичной ПМУ: ТМУ- α - β , где α обозначает диаметр мембранного элемента в дюймах, а β – их число. ТМУ может создавать заданное значение солесодержания для моделируемого мембранного элемента в составе промышленной УОО, однако обычно не известны другие параметры для этого элемента: производительность, доля отбора, содержание и состав неминеральных компонентов. Даже, если формально общее количество загрязнений будет соответствовать моделируемому параметру, его качественная структура может существенно отличаться в силу значительного времени пребывания в зоне рециркуляции. Эти же замечания относятся и к микробиологическим показателям. Могут заметно отличаться и показатели очистки по солям для заданного мембранного элемента на ТМУ и ПМУ.

2.5.1. Методика проведения эксперимента

Для сравнения работы этих установок и оценки возможности их применения в задачах проектирования был выполнен ряд экспериментальных исследований. Исходные данные:

- Удельная электропроводность исходной скважной воды $C_{исх} = 921$ мкСм/см, жесткость $Ж_{исх} = 9,1$ мг – экв/л, рабочая температура $t_{раб} = 16^{\circ}\text{C}$.

- Основной задачей являлось моделирование работы УОО, основанной на стандартной (наиболее распространенной) схеме 2хОМЭ₆-1хОМЭ₆ с долей отбора $r = 0,75$ ($r = Q_{\phi}/Q_u$, Q_u – поток исходной воды).

- Моделирование с помощью ПМУ выполнялось на базе 6-ти мембран типоразмера 4040 (ПМУ-4-6) с принципиальной схемой, представленной на рисунке 2.7. На этой же схеме была основана ТМУ, которая включала возможность работы на двух мембранных элементах 4040. В экспериментах использовался только один мембранный элемент, то есть ТМУ-4-1.

Эксперимент на ПМУ выполнялся в две стадии: обработка исходной воды, а затем обработка полученного концентрата. Для оценки ожидаемого качества пермеата моделируемой УОО фильтраты первого и второго эксперимента смешивались в пропорциях промышленной установки:

$$\chi_y = (2 \cdot \chi_{\phi 1} \cdot Q_{\phi 1} + \chi_{\phi 2} \cdot Q_{\phi 2}) / (2 \cdot Q_{\phi 1} + Q_{\phi 2}) \quad (2.3),$$

где $Q_{\phi 1}$, $Q_{\phi 2}$, $\varkappa_{\phi 1}$, $\varkappa_{\phi 2}$ – производительность и удельная электропроводность фильтрата ПМУ в соответствующих экспериментах. В первом эксперименте $p_{вх1} = 12,6$ атм, производительность $Q_{\phi 1} = 1,35$ м³/ч, $\varkappa_{\phi 1} = 13,7$ мкСм/см. Во втором эксперименте входное давление было установлено равным давлению концентрата в первом – 11,7 атм, при этом производительность составила 0,97 м³/ч при удельной электропроводности $\varkappa_{\phi 2} = 38,3$ мкСм/см. Таким образом, ожидаемое качество пермеата УОО составило 20,8 мкСм/см. То есть

ожидаемая селективность $S_y \approx 98\%$. Это заметно ниже результатов компьютерного моделирования. Существенным фактором, не учитываемым в компьютерных расчетах, является вклад растворенной углекислоты в удельную электропроводность. Для оценки ее вклада можно использовать соотношение:

$$\chi_{CO_2} \approx \gamma \cdot \sqrt{C_{CO_2}} \quad (2.4),$$

где удельная электропроводность измеряется в мкСм/см, а концентрация углекислоты C_{CO_2} в мг/л. В наших экспериментах он составил 4 мкСм/см. Это увеличивает фактическую селективность до величины $S_y \approx 98,4\%$. Существенный интерес вызывают рабочие параметры последнего (по линии потока) мембранного элемента, где наблюдается максимальная степень концентрирования. Для условий данного эксперимента удельная электропроводность фильтрата на выходном МЭ составило $\varkappa_{12}=63$ мкСм/см при производительности $q_{12}=138$ л/ч. Поток концентрата составлял $Q_k=1010$ л/ч, а его удельная электропроводность $\varkappa_k=3589$ мкСм/см.

Задача моделирования промышленной УОО на ТМУ значительно сложнее. Подчеркнем еще раз, что смоделировать ожидаемое качество фильтрата не представляется возможным. Моделирование работы отдельных элементов также является не простой задачей. Это связано с неопределенностью выбора рабочих параметров для заданного МЭ: производительность, текущая концентрация растворенных веществ. В ряде случаев можно выполнить компьютерное моделирование на стандартных расчетных программах, и оценить рабочие параметры для заданного МЭ. Эксперименты на ТМУ позволяют их уточнить, доопределить условия эксплуатации, определить ряд параметров необходимых для проектирования и т. д.

Для ТМУ была поставлена задача воспроизвести результаты работы выходного элемента моделируемой ПМУ. Целью моделирования было обеспечение удельной электропроводности концентрата $\varkappa_k=3450$ мкСм/см.

Эта величина была взята из вышеописанного эксперимента с ПМУ. Однако, ее можно получить, как целевую с помощью формул (2.5) и (2.6):

$$C_K = C_{BX} \cdot (1-r)^{-\varphi_{II}} \quad (2.5),$$

где $C_{вх}$ и C_K – концентрации солей в исходной воде и концентрате при задано, $\varphi_{II} = S_{II}/100\%$ – коэффициент истинной селективности, $r = Q_{\phi}/Q_{BX}$ – доля отбора фильтрата.

$$\chi_K \approx \frac{C_K}{C_{BX}} \cdot (\chi_{BX} - \chi_{CO_2}) + \chi_{CO_2} \quad (2.6)$$

В качестве значений концентраций солей берутся те, вклад которых является наибольшим в общее солесодержание. Мы полагаем, что мембрана не задерживает свободную углекислоту. В практических условиях при моделировании работы выходного модуля мы не знаем его производительности q_j (в данном случае $q_j = q_{12}$), но можем задать поток концентрата:

$$q_j^K = Q_K^{ycm} / N \quad (2.7),$$

здесь Q_K^{ycm} – поток концентрата проектируемой установки, он определяется ее проектными значениями Q_{ϕ} и r , N – число каскадов в ней (в данном случае $N=2$). Для УОО производительностью $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ при $r=0,75$ поток концентрата $Q_K^{ycm} \approx 16,7 \text{ м}^3/\text{ч}$, $N=3$. Тогда $q_{12}^K \approx 5,6 \text{ м}^3/\text{ч}$. Поток концентрата на выходе из мембранного блока $Q_K^{\phi K}$ для ТМУ- α - β при моделировании работы выходного МЭ определяется выражением:

$$Q_K^{\phi K} = q_j^K \cdot S_{MЭ}(\alpha) / S_{MЭ}(8'') \quad (2.8),$$

где $S_{MЭ}(\alpha)$ и $S_{MЭ}(8'')$ – площади мембранных элементов ТМУ (в данном эксперименте $\alpha = 4''$) и проектируемой УОО. Для современных обратноосмотических элементов типичным значением является $S_{MЭ}(8'') \approx 37 \text{ м}^2$, а $S_{MЭ}(4'') \approx 7,2 \text{ м}^2$. В этом случае $Q_K^{\phi K} \approx 1,1 \text{ м}^3/\text{ч}$. Это на 10% больше, чем было получено в эксперименте с ПМУ-4-6. Поток $Q_{конц}^{\phi K} = Q_{конц}^{набл} + Q_{реци}$, здесь $Q_{конц}^{набл}$ – наблюдаемый сброс концентрата, а $Q_{реци}$ – поток рециркуляции

он должен обеспечить необходимую степень концентрирования и планируемую удельную электропроводность концентрата α_k , которая определяется из выражения (2.6). Для исходного качества воды с $\alpha_{вх} = 921$ мкСм/см, было выбрано $\varphi_u = 0,993$ – коэффициент селективности по солям жесткости и $\alpha_k \approx 3637$ мкСм/см. Экспериментально на ТМУ удалось настроить установку на параметр $Q_{конц}^{факт} \approx 1,1 \pm 0,05 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $\alpha_k \approx 3610 \div 3665$ мкСм/см. Разброс данных определяется небольшой нестационарностью процесса и точностью измерения потоков. Поток фильтрата был равен $Q_{фил} \approx 0,161 \pm 0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$, а его качество $\alpha_{фил} \approx 56 \pm 2$ мкСм/см. Производительность на ТМУ хорошо коррелирует с результатами компьютерного моделирования: $0,16 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Сравнивая результаты, полученные на ПМУ и ТМУ можно констатировать сопоставимость результатов. По удельной электропроводности они близки с точностью до 10%, производительность отличалась на 16%. Разница обусловлена, по-видимому, более высокой в сравнении с расчетной производительностью входных (первых по линии тока) мембранных элементов. Сопоставимость результатов находится на грани приемлемости и эта точность может быть недостаточной для задач проектирования.

2.6. Экспериментальное определение истинной селективности и коэффициента солепропускания обратноосмотической мембраны.

Методика проведения и результаты экспериментов

Одной важнейшей характеристикой для проектирования УОО является знание истинной селективности мембраны S_n , которая определяется как ее собственной структурой, так и химическим составом обрабатываемой воды. Во многих случаях данных о величине S_n для конкретных солей или химических соединений нет. Также неизвестна ее зависимость от концентрации других соединений $S_n = S_n(C_j | \sum C_k)$, здесь C_j – концентрация соединения типа j , а C_k – концентрации других растворенных соединений.

Обычно эти исследования производятся в лабораториях на специальных измерительных ячейках. В практических условиях многие организаций и компаний не имеют такой возможности. Однако для этих целей могут быть использованы ТМУ. Эти установки позволяют определять S_u на основе измерения наблюдаемой селективности S (или коэффициента солепропускания $sp = 1 - \varphi$). Величина sp определяется выражением: $sp_j = C_{\phi,j} / C_{BX,j}$ (индекс j далее опускаем). Она является функцией истинного коэффициента солепропускания sp_u и результата усреднённого фильтрования по длине мембранного элемента:

$$C_{\phi} = \frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} C_{\phi}(x) dx \quad (2.9)$$

Это усреднение может быть заменено усреднением по доле отбора фильтрата:

$$C_{\phi} = \frac{1}{r} \int_0^r C_{\phi}(\dot{r}) d\dot{r} \quad (2.10)$$

В данной точке r концентрация фильтрата определяется выражением $C_{\phi}(\dot{r}) = sp_H \cdot C_K(\dot{r})$. Для величины C_K выполняется выражение (2.5). Подставляя его в (2.10) и выполняя интегрирование:

$$C_{\phi} = \frac{s}{r} \cdot \int_0^r \frac{C_{BX}}{(1-r')^{1-s}} d\dot{r} = C_{BX} \cdot (1 - (1-r)^s) / r = sp \cdot C_{BX} \quad (2.11)$$

Известный результат: здесь $s = sp_u$.

Для ТМУ работающей в режиме рециркуляции выражение (2.11) справедливо для фактического коэффициента солепропускания:

$$sp^{\phi K} = C_{\phi} / C_{BX} = (1 - (1 - r_{\phi K})^s) / r_{\phi K}, \quad (2.12),$$

здесь $r_{\phi K} = Q_{\phi} / Q_{BX}$ – фактическая доля отбора фильтрата, она отличается от наблюдаемой: $r_H = Q_{\phi} / Q_H$. Последняя всегда больше наблюдаемой, из-за наличия рециркуляции: $Q_{BX} = Q_H + Q_P$. Величину потока рециркуляции определим через значение наблюдаемого потока концентрата Q_K^H : $Q_P = \alpha \cdot Q_K^H$.

Это определяет связь между $r_{\phi K}$ и r_H :

$$r_{\Phi K} = r_H / (1 + \alpha \cdot (1 - r_H)) \quad (2.13.1)$$

$$r_H = r_{\Phi K} \cdot (1 + \alpha) / (1 + \alpha \cdot r_{\Phi K}) \quad (2.13.2)$$

А также связывает наблюдаемый коэффициент солепропускания $sp^H = C_{\Phi} / C_H$ с фактическим:

$$sp^H = sp^{\Phi K} \cdot (1 + \alpha \cdot r_{\Phi K}) / (1 + \alpha \cdot r_{\Phi K} \cdot sp^{\Phi K}) \quad (2.14)$$

Используя выражения (2.5), (2.12), (2.13), (2.14) находим связь между наблюдаемым и истинными коэффициентами солепропускания:

$$sp^H = \frac{(1 + \alpha) \cdot ((1 + \alpha \cdot (1 - r_H))^s - (1 + \alpha)^s \cdot (1 - r_H)^s)}{r_H \cdot ((1 + \alpha \cdot (1 - r_H))^s \cdot (1 + \alpha) - \alpha \cdot ((1 + \alpha)^s \cdot (1 - r_H)^s))} \quad (2.15)$$

Здесь для простоты записи введена замена $sp_u = s$. При $\alpha \rightarrow 0$ соотношение (2.15) переходит в формулу (2.12). Полученное выражение описывает функциональную зависимость $sp^H = sp^H(r_H, \alpha, sp_H)$, при этом $sp_H = sp_H(C_j | \sum C_k)$ определяет истинную селективность для соединений типа j и ее зависимость от концентрации и других присутствующих соединений. Выражение (2.15) позволяет рассчитать функциональную зависимость $sp^H = sp^H(sp_H)$ при заданных значениях r_H и α . Измеряя экспериментально sp^H для этих значений r_H и α и используя рассчитанную $sp^H(sp_H)$ можно определить величину истинного солепропускания sp_u . Эта процедура показана на рисунке 2.10, где представлены результаты расчета и экспериментального измерения солепропускания сульфата магния. Эксперимент выполнялся на ТМУ-4-2, то есть установка содержала 2 мембранных элементах с типоразмером 4040 (NanoRO К 4040-С, производитель – компания «РМ Нанотех»), среднее трансмембранное давление в проведенных экспериментах было практически одинаковым: $12,1 \pm 0,1$ атм. В первом эксперименте исходное солесодержание и расход воды составили $C_u = 6301 \pm 20$ мг/л, $Q_{ex} = 2,5$ м³/ч, а поток фильтрата и его солесодержание: $Q_{\Phi} = 0,7$ м³/ч, $C_{\Phi} = 10,6 \pm 0,5$ мг/л при потоке концентрата $Q_K = 1,8$ м³/ч. Таким образом, наблюдаемое солепропускание $sp^H = (1,62 \pm$

$0,10) \cdot 10^{-3}$, что соответствует значению истинного солепропускания $sp_u = (1,32 \pm 0,10) \cdot 10^{-3}$, которое определяется выражением (2.15), при $r_{\phi k} = r_n = 0,28$, $\alpha = 0$ (рисунок 2.10а).

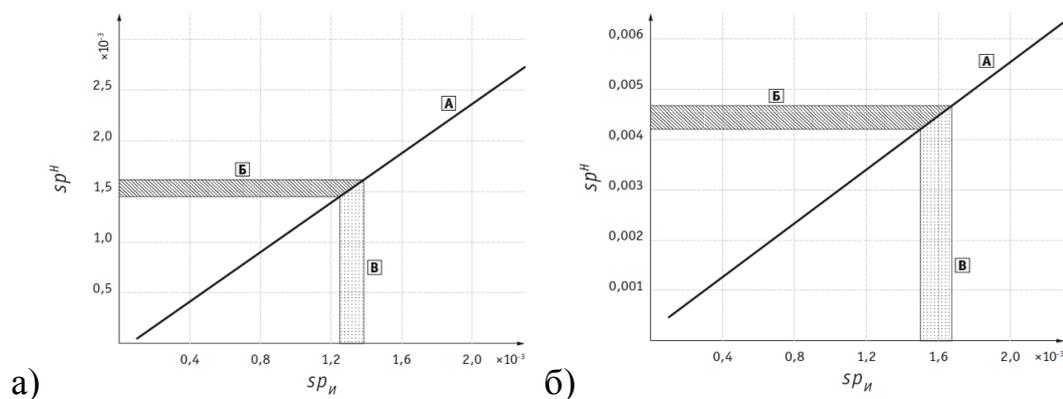


Рисунок 2.10: а) – результат аппроксимации наблюдаемого и истинного коэффициента солепропускания при $r_{\phi k} = r_n = 0,28$, $\alpha = 0$; б) – результат аппроксимации наблюдаемого и истинного коэффициента солепропускания при $r_n = 0,67$, $\alpha = 9$

Во втором эксперименте $C_u = 5400 \pm 20$ мг/л, $Q_{ex} = 0,9$ м³/ч, $Q_{\phi} = 0,6$ м³/ч, $C_{\phi} = 24,0 \pm 0,5$ мг/л, $Q_k = 0,3$ м³/ч и $Q_p = 2,7$ м³/ч. При этом, солесодержание на входе в мембранный модуль было 16,8 г/л, на выходе (концентрат) 20,4 г/л. Эти данные соответствуют $r_n = 0,67$, $\alpha = 9$, $sp^H = (4,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$, что соответствует аппроксимации $sp_u = (1,59 \pm 0,10) \cdot 10^{-3}$ (рисунок 2.10б).

Таким образом, при увеличении солесодержания примерно в 2 раза (солесодержание концентрата в первом эксперименте было около 9,7 г/л) истинное солепропускание обратноосмотической мембраны увеличилось на 20%. Этот результат согласуется с современными теоретическими представлениями о снижении селективности обратноосмотических мембран с увеличением концентрации растворенных веществ вследствие уменьшения размера сольватной оболочки [97]. Результаты опытов показывают, что селективность обратноосмотических мембран зависит от концентрации растворенного вещества и снижается с увеличением его содержания в

исходном растворе ($C_{и}$). Рабочие параметры установки также оказывают влияние на значение истинной селективности. Стоит отметить, что разработанная методика позволяет определять данный параметр в рабочих условиях на реальных растворах с учетом колебаний параметров исходной воды (состав примесей) и влияния концентрационной поляризации.

2.7. Оценка погрешности экспериментальных данных

Методика проведения экспериментов, приборы измерений, система измерений и способы обработки полученных экспериментальных данных должны обеспечить максимальную точность определяемых величин. Определяемая величина в результате измерений получается всегда с некоторой погрешностью.

Некоторыми причинами возникновения погрешностей (ошибок) измерений являются: несовершенство измерительных приборов (инструментальные погрешности), несовершенство выбранного метода измерений или влияния лабораторных приборов на измеряемую величину (методологические погрешности), влияние внешних условий на одну или несколько величин, влияющих на результат, например, температуры, влажности воздуха, внешних электрических и магнитных полей и т.п. (внешние погрешности), неправильный отсчет показаний приборов, невнимательность и небрежность исследователя (субъективные погрешности). Такие погрешности обычно легко устранимы, например, использованием цифровых измерительных приборов.

Однако, если перечисленные выше погрешности можно устранить, то некоторые виды погрешностей никаким образом устранить нельзя, а можно только уменьшить. К таким видам ошибок можно отнести, например, систематические и случайные погрешности. Практически систематические и случайные погрешности неизбежны и могут быть описаны только методами математической статистики.

Систематические погрешности – погрешности, связанные с ограниченной точностью изготовителя измерительных приборов, неправильным выбором метода измерений, пренебрежением влияния некоторых факторов. Систематические погрешности вызываются определенными причинами, величина их при повторных измерениях остается постоянной, либо изменяется по определенному закону. Поэтому устранение систематических ошибок в экспериментах достигается за счет тщательной тарировки приборов, постоянной калибровки аппаратуры в ходе экспериментов, проверке и анализе методов определения измеряемых величин.

Случайные погрешности вызываются большим числом случайных величин, действие которых на каждое измерение различно и не может быть заранее учтено. Для уменьшения влияния этих погрешностей необходимо производить не одно, а несколько измерений одной и той же величины. Повторяемость экспериментальных точек позволит исключить случайные ошибки.

При измерении физических величин с помощью даже самых точных и совершенных средств и методов их результат всегда отличается от истинного значения измеряемой физической величины, т.е. определяется с некоторой погрешностью. Погрешности, полученные в ходе измерений и расчетов экспериментальных данных, обязательно должны быть рассчитаны и представлены.

A – измеряемая величина, \bar{A} – среднее значение измеряемой величины, $\Delta\bar{A}$ – абсолютная погрешность среднего значения измеряемой величины,

$\delta = \frac{\Delta\bar{A}}{\bar{A}} \times 100\%$ - относительная погрешность измеряемой величины.

Тогда среднее значение величины в приведенных измерениях

$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$. Для многократных измерений случайная составляющая

погрешности определяется $\Delta \bar{A}_{сл} = t_{\gamma, n-1} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}}$. Для ее расчета

необходимо принять доверительную вероятность p и по таблицам определить коэффициент Стьюдента (например, для трехкратных измерений $t_{\gamma, n-1} = 4.303$). Инструментальная погрешность определяется по классу

точности, указанном в паспорте прибора и рассчитывается по формуле $\Delta A_{и} = \frac{\text{кл. точн. предел шкалы}}{100\%}$, если класс точности не указан, то принимается

половине цены деления шкалы прибора $\Delta A_{и} = \frac{\text{цена деления}}{2}$. Если в результате

экспериментов нет разброса значений, то в качестве погрешности выбирается

стандартная инструментальная погрешность. Если она сравнима со

случайной, то полная абсолютная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta A = \sqrt{\Delta A_{и}^2 + \Delta A_{сл}^2}.$$

Общая формула для расчета абсолютной погрешности при косвенных измерениях физической величины для произвольного вида f функции имеет вид:

$$\Delta_A = \sqrt{\left(\frac{df}{dA_1}\right)^2 \cdot \Delta A_1^2 + \left(\frac{df}{dA_2}\right)^2 \cdot \Delta A_2^2 + \dots + \left(\frac{df}{dA_n}\right)^2 \cdot \Delta A_n^2},$$

где $\frac{df}{dA_i}$ - частные производные функции f A_1, A_2, \dots, A_n по аргументу A_i .

В качестве примера нижеприведен расчет абсолютной и относительной погрешности определения коэффициента солепропускания обратноосмотической мембраны по раствору сульфата магния:

$$sp = \frac{C_{\phi}}{C_{исх}} = \frac{24}{5400} = 0,0044$$

Абсолютная погрешность измерения C_{ϕ} и $C_{исх}$ (принимается инструментальная погрешность):

$$\Delta C_{\phi} = \frac{0,1 \cdot 500}{100\%} = 0,5 \text{ мг/л}$$

$$\Delta C_{исх} = \frac{1 \cdot 10000}{100\%} = 100 \text{ мг/л}$$

Абсолютная погрешность косвенного определения значения коэффициента солепропускания:

$$\Delta sp = \sqrt{\left(\frac{1}{C_{исх}}\right)^2 \cdot \Delta C_{\phi}^2 + \left(-\frac{C_{\phi}}{C_{исх}^2}\right)^2 \cdot \Delta C_{исх}^2}$$

$$\Delta sp = \sqrt{\left(\frac{1}{5400}\right)^2 \cdot 0,5^2 + \left(-\frac{24}{5400^2}\right)^2 \cdot 100^2} = 0,0001$$

Тогда относительная погрешность косвенного определения значения коэффициента солепропускания:

$$\delta sp = \frac{\Delta sp}{sp} = \frac{0,0001}{0,0044} = 0,023 = 2,3\%$$

Далее по главам диссертации приведены результаты экспериментального определения прямых и косвенных измерений с учетом погрешности. На графиках также указаны пределы погрешности величин и значений.

Основные технические характеристики приборов хим. контроля, измерительных приборов и их точность представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Основные технические параметры приборов контроля и измерения

Измеряемая величина	Название производителя	Диапазон измерений	Точность
Электропроводность	Burkert	0-200 мкСм/см	±0,2 мкСм/см
		0-2 000 мкСм/см	±20 мкСм/см
		0-10 000 мкСм/см	±100 мкСм/см
Температура	Wika (ВИКА МЕРА)	0-120°C	±0,12°C
Давление (манометры)		0-25 бар	±0,25 бар
		0-10 бар	±0,1 бар
Давление (датчики давления)	БД Сенсорс	0-25 бар	±0,125 бар
		0-10 бар	±0,05 бар
Расход	Burkert	0-1 м ³ /ч	±0,04 м ³ /ч
		0-20 м ³ /ч	±0,8 м ³ /ч
Расход	УРЖ2КМ	0-100 м ³ /ч	±1,0 м ³ /ч
Расход	Georg Fisher	0-300 л/ч	±11,67 л/ч
		0-500 л/ч	±16,58 л/ч

2.8. Выводы по главе

1. При проведении пилотных испытаний установок обратного осмоса введено понятие обобщенного мембранного элемента (ОМЭ). Предложена классификация пилотных установок, проведен экспериментальный сравнительный анализ их эффективности.

2. Выполненное в работе исследование показало, что надежное моделирование промышленной УОО возможно с помощью пилотных мембранных установок, имеющих в качестве базы мембранного блока ОМЭ_n с таким же числом n стандартных элементов, как и промышленная УОО.

3. На основании проведения ряда пилотных испытаний были разработаны основные подходы к моделированию промышленных установок обратного осмоса. Сформулированы основные методологические подходы к проведению процедуры пилотных испытаний. Приведены рекомендации к созданию пилотных установок. Приведены основные преимущества проектирования УОО на основе проведения пилотных испытаний.

4. На основании использования тестовых мембранных установок предложена технология и метод определения истинной локальной селективности и солепропускания обратноосмотических мембран. Предложена математическая модель расчета истинной селективности на основе экспериментальных результатов работы тестовой мембранной установки. Показано, что разработанная модель позволяет получать данные при различных рабочих условиях, по минеральным и органическим соединениям, а также в области высоких концентраций.

5. Представлены результаты экспериментальной апробации предложенной модели на концентрированных растворах сульфата магния. Показано, что истинное солепропускание обратноосмотической мембраны при исходной концентрации до 16,8 г/л не превышает значение $sp_{и} = (1,59 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$.

6. Выполненный сравнительный анализ методов проектирования установок обратного осмоса позволил определить ключевые недостатки и ошибки, возникающие в процессе технологического проектирования. Описаны методы их устранения и минимизации. Приведены ряд правил и рекомендаций по выработке эффективных проектно-технических решений при проектировании системы водоподготовки.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОНОВКИ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСТАНОВКАХ ОБРАТНОГО ОСМОСА

Основной составляющей в установке обратного осмоса является мембранный элемент. Исходная вода, проходя через него под высоким давлением, делится на концентрированный сток и фильтрат. Поэтому выполнение качественного монтажа мембранных элементов и замена их в процессе работы, требует применения оптимальных схем установки мембран в корпус и тщательного подбора аналогов для мембран, вышедших из строя. Особенно это актуально для крупных промышленных установок, работающих на ТЭС, поскольку в процессе их эксплуатации требуется обеспечить стабильное качество и количество очищенной воды.

3.1. Основные характеристики установок обратного осмоса

Если учитывать, что наиболее распространенные мембранные элементы в промышленных УОО имеют производительность около $1 \text{ м}^3/\text{ч}$, то число МЭ в компоновке превышает 15 штук, а часто составляет 50-100 штук и более. Выделим ключевые особенности технических характеристик одного МЭ в промышленной установке, от которых зависит качество очищенной воды, производительность [98, 121, 125]:

- селективность по удалению растворенных солей около 99 – 99,5%;
- гидравлический КПД (коэффициент полезного действия) или степень извлечения фильтрата – $R_{МЭ}$ около 10%.

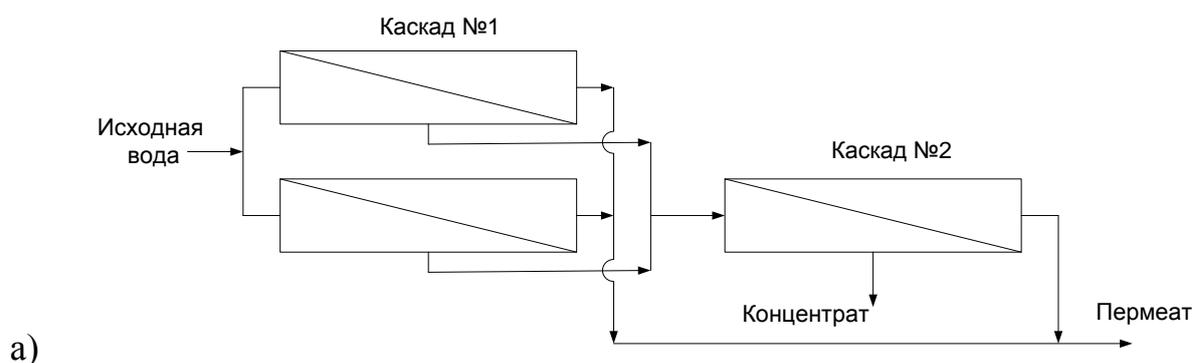
Гидравлический КПД фильтровального процесса (*recovery* в англоязычной литературе) определим как отношение количества готового продукта (расход пермеата $Q_{\text{фил}}$) к количеству исходной воды (расход $Q_{\text{исх}}$):

$$R = \frac{Q_{\text{фил}}}{Q_{\text{исх}}} \cdot 100\% = r \cdot 100\% \quad (3.1),$$

где r – доля отбора фильтрата, $R_{МО}$ – это значение R для одного мембранного элемента, а $R_{уст}$ описывает гидравлическую эффективность всей установки.

Как правило, простые однолинейные (однокаскадные) установки, содержащие 1÷4 элемента в концентратной линии, имеют невысокое значение $R_{уст} \approx 10 \div 40\%$, что приводит к большим расходам воды на собственные нужды и снижает экономическую эффективность процесса [99]. Для повышения значения $R_{уст}$ часто используется рециркуляция концентрата. Это позволяет существенно сократить потери воды. Однако это приводит к существенному увеличению солесодержания, как исходной воды, так и получаемого фильтрата. Для промышленных установок, этот метод неэффективен и однолинейные схемы существенно ограничены в применении.

Для увеличения гидравлического КПД установки ($R_{уст}$), с целью ресурсосбережения воды, а также для обеспечения необходимых производительностей, используется многокаскадная компоновка корпусов, так называемая «ёлочка» [100]. В таких установках применяются схемы, состоящие из одного или нескольких каскадов, при этом концентрат, образовавшийся на предыдущем каскаде, служит питающей водой для последующего. Количество подаваемой на каждый последующий каскад воды уменьшается примерно вдвое и, следовательно, для ее обработки требуется вдвое меньшее количество модулей (мембранных элементов). На рисунке 3.1 представлены различные схемы компоновки многокаскадных установок.



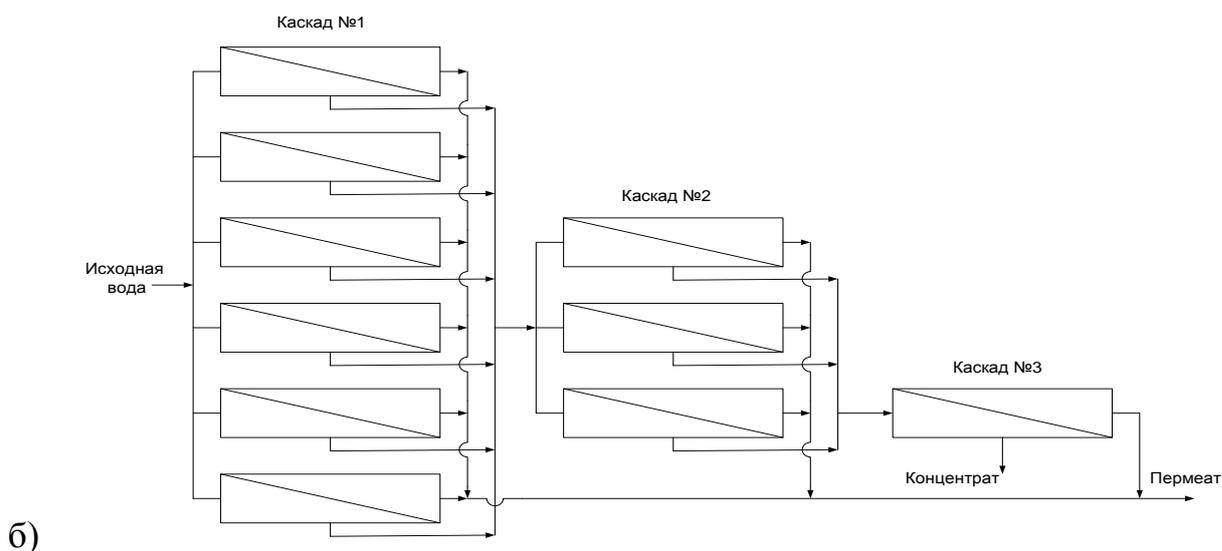


Рисунок 3.1. а) базовая схема двухкаскадной "ёлочки"; б) базовая схема трехкаскадной "ёлочки"

Типичный базовый модуль двухкаскадной «ёлочки» (рисунок 3.1а) содержит 15-18 элементов, которые включают два параллельно работающих корпуса по пять-шесть мембранных элементов в первом каскаде и один корпус с пятью-шестью мембранами во втором каскаде. Аналогичное строение имеет трехкаскадная система (рисунок 3.1б). Такие конструкции УОО позволяют получить гидравлический КПД на уровне 70-75% для двухкаскадных и до 85% для трехкаскадных [101, 106-108, 120].

Мембранные элементы, в силу продольного концентрирования и истощения потоков по мере фильтрования, функционируют в различных рабочих условиях, отличающихся по следующим параметрам:

- величина рабочего давления;
- солесодержание;
- поток поступающей воды;
- концентрация загрязняющих веществ и т.д.

Проектирование многокаскадных установок базируется на идентичности технических характеристик всех МЭ. Однако может иметь место различие в индивидуальных характеристиках мембранных элементов:

- по рабочему трансмембранному давлению;

- по гидравлическому продольному сопротивлению и, соответственно, потере давления;
- по селективности;
- по удельной проницаемости;
- по площади.

Это связано с особенностями производства мембран. Производители МЭ указывают, что отклонения персональных характеристик мембраны от паспортных могут достигать $\pm 15\%$. Вышеуказанные обстоятельства могут существенным образом влиять на характеристики работы промышленной установки в целом. В частности, приводят к снижению качества фильтрата и производительности установки. Также этот факт следует учитывать как при конструировании установки, так и при монтаже (компоновке) МЭ в установке.

3.2. Система оптимизации установочного порядка. Определение персональных характеристик мембранных элементов

Проведенное исследование компоновки МЭ в УОО на различных объектах показало, что их обычная замена, без учета индивидуальных характеристик, может снизить рабочие характеристики и отрицательно повлиять на устойчивость работы оборудования.

Также необходимо учитывать, что вид выполненного монтажа МЭ может изменить различные гидравлические параметры работы. Под видом монтажа следует понимать выбор схемы установки, соединения и крепления МЭ в корпусе, последовательность и периодичность их замены. Неудачный выбор конфигурации монтажа МЭ может приводить к следующим неблагоприятным обстоятельствам:

- перекоосу (неравномерному распределению) потоков по разным корпусам в одном каскаде;
- возникновению существенного различия в перепаде давления внутри каскада;

- ухудшению качества фильтрата;
- отличию доли отбора на фиксированном МЭ от расчетного, что приводит к росту поперечного концентрирования (концентрационной поляризации), существенному отличию фактической производительности от расчетной и т.д.

Для решения этих проблем и повышения эффективности работы обратноосмотического оборудования предлагается система оптимизации установочного порядка (СОУП) мембранных элементов. Первым шагом этой системы является процедура определения персональных характеристик (ОПХ) мембранных элементов. Эту процедуру необходимо производить при его проектной рабочей производительности Q_{np} МЭ. Значение Q_{np} определяется следующим образом:

$$Q_{np} = Q_{фил} / N_{мэ} \quad (3.2),$$

где производительность установки $Q_{фил}$ является задаваемой величиной, а $N_{мэ}$ – число мембранных элементов, определяемое базовым проектированием с помощью стандартных расчетных программ, предоставляемых производителями мембранных элементов. При процедуре ОПХ определяются следующие параметры МЭ:

- $\Delta p_{тм}$ – рабочее трансмембранное давление;
- Δp_{np} – гидравлическое продольное сопротивление;
- $S_{мэ}$ – селективность или солепропускание ($Sp_{мэ}$) мембранного элемента;
- r – доля отбора фильтрата.

Определим понятие порядкового номера в установке для мембранного элемента с серийным номером γ от производителя. Пусть i – номер каскада (1, 2 или 3), j – номер фильтродержателя (рабочего корпуса высокого давления) в каскаде, а k – порядковый номер МЭ по направлению потока воды. Если F некоторая величина ($\Delta p_{тм}$, Δp_{np} , $S_{мэ}$ или r) для МЭ на ijk – месте, то персонифицированный параметр определим $F^{i,j,k}(\gamma, Q_{np})$.

Процедура ОПХ определяет $F^{i,j,k}(\gamma)$. Набор этих экспериментальных данных обозначим ЭД-Пр.

При этом рекомендуется производить процедуру ОПХ на воде с близкими параметрами, отвечающими действующей установке. Например, при концентрации растворенных солей $(2 \div 3) \cdot C_{исх}$, где $C_{исх}$ – солесодержание исходной воды на предприятии.

В условиях реальной установки каждый мембранный элемент занимает свое персональное место в компоновке мембранного блока – ijk и имеет производительность $Q^{i,j,k}(\gamma)$, отличную от Q_{np} , которая определяется производительностью установки (см. формулу 3.2). Отличаются и другие вышеуказанные параметры. Для расчетов с использованием персонализированных данных предлагается использовать метод расчетной аппроксимации, а также балансовые уравнения для потоков воды (исходная вода, фильтрат и концентрат), концентраций растворенных в ней веществ. Метод расчётной аппроксимации аналогичен тому же, что используется в стандартных расчетных программах. Но отличается тем, что исходные данные в СОУП для рабочих параметров находятся из экспериментально определенных данных, а не из паспортных и идентичных для всех МЭ. Для расчетов необходимо иметь набор следующих данных: $F^{i,j,k}(\gamma, Q)$ и $Q(\gamma, F^{i,j,k}(\gamma, Q_{np}))$. Эти данные определяются аппроксимацией:

$$F^{i,j,k}(\gamma, Q) = F^{i,j,k}(\gamma, Q_{np}) + \alpha^{i,j,k}(\gamma) \cdot (Q - Q_{np}) \quad (3.3)$$

$$Q(\gamma, F^{i,j,k}(\gamma, Q_{np})) = Q_{np} + \sum_F \beta_F^{i,j,k}(\gamma) \cdot (F^{i,j,k}(\gamma, Q) - F^{i,j,k}(\gamma, Q_{np})) \quad (3.4)$$

Для определения эмпирических параметров аппроксимации α делается процедура ОПХ-А, которая заключается в определении ЭД-А⁺ и ЭД-А⁻, которые определяются при производительности мембранных элементов $Q_{np} \pm 1$ м³/час соответственно. А также при ЭД-Аs, которая определяется при 4-кратном превышении солесодержания исходной воды на предприятии. На основе данных ЭД-Пр, ЭД-А⁺ и ЭД-А⁻ и выражения (3.4) получаются

значения α . Для определения эмпирических параметров аппроксимации β делается процедура ОПХ-R, обратная ОПХ-A.

Полученные данные персональных характеристик каждого элемента позволяют определить оптимальный установочный порядок.

Для определения персональных технических характеристик мембранных элементов применялась исследовательская установка, внешний вид и схема которой представлена на рисунках 3.2-3.3.



Рисунок 3.2. Фото экспериментальной установки для тестирования обратноосмотических мембран 8”

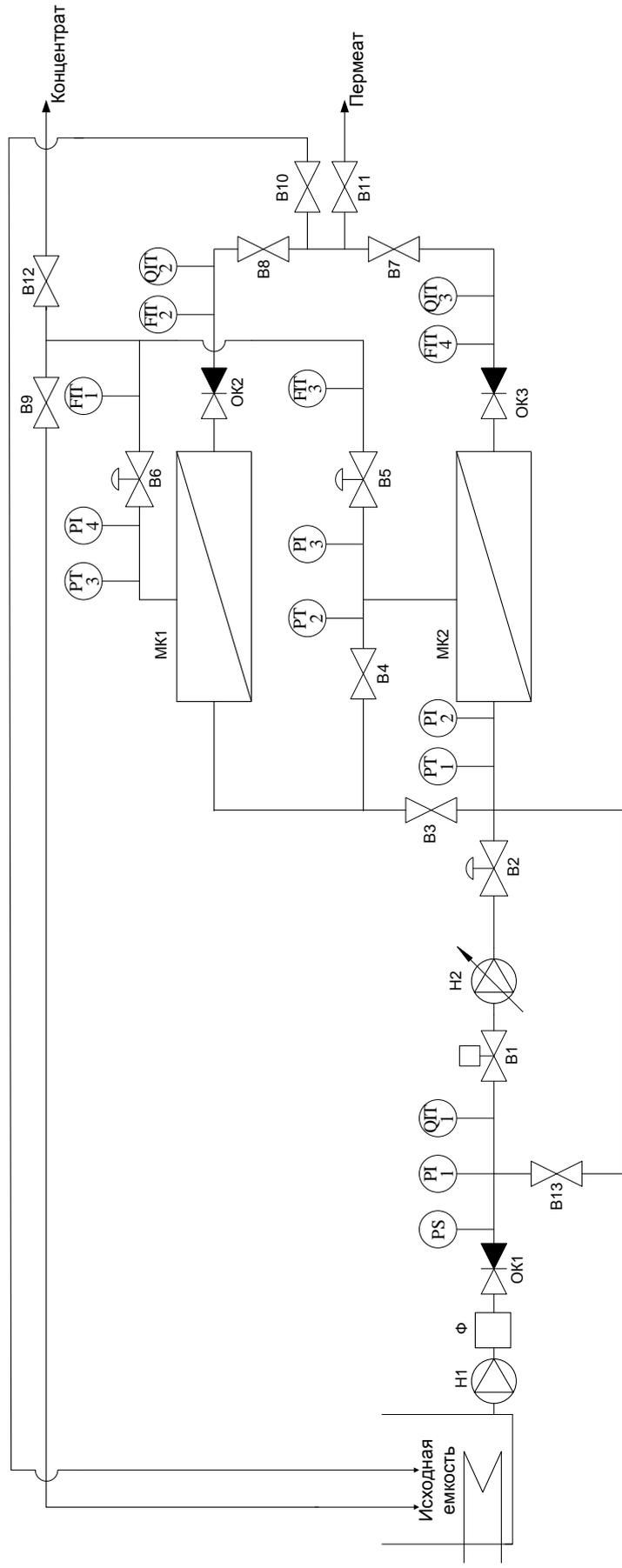


Рисунок 3.3. Гидравлическая схема установки для тестирования обратноосмотических мембран 8”

Установка включает: т/о – водяной теплообменник, Н1 – насос подкачки, Н2 – повышающий насос с частотным регулированием, Ф – микрофильтр, МК – мембранный корпус высокого давления на один мембранный элемент 8” , РТ– датчики давления исходной воды, потока концентрата из МК1 и МК2, FIT – расходомеры фильтра, концентрата МК1 и МК2, QIT – кондуктометры входной воды, фильтра МК1 и МК2, PS – реле давления, PI – манометр исходной воды, потока концентрата из МК1 и МК2, B1-B13 – регулировочные вентили, ОК1÷ОК3 – обратные клапаны.

Персонализация рабочих характеристик обратноосмотических мембран проводилась на установках обратного осмоса ДВС-М/150-8-54 (производитель АО «НПК «Медиана-Фильтр», Россия) единичной производительности 50 м³/ч, работающих на Серовской ГРЭС. При эксплуатации оборудования наблюдались нестабильные выходные параметры (различные значения производительности и селективности по корпусам). Одной из возможных причин данного явления может быть длительное хранение мембранных элементов перед началом эксплуатации оборудования. В таблице 3.1 представлены данные работы первого каскада данной установки (шесть корпусов по шесть МЭ диаметром 8”).

Таблица 3.1

Значения производительности и селективности корпусов в первом каскаде
ДВС-М/150-8-54

№ корпуса	Производительность по фильтрату, м ³ /ч	Селективность, %	Солепропускание, % (степень очистки)
1	6,2	98,57	1,43
2	5,8	98,59	1,41
3	5,7	97,49	2,51
4	5,9	97,85	2,15
5	6,4	98,04	1,96
6	6,9	97,32	2,68

Из приведенных данных видно, что имеется значительный разброс производительности (до 20%) и степени очистки (отличие до 2-х раз) по корпусам. При непосредственном участии автора совместно с коллективом сотрудников АО «НПК Медиана-Фильтр» были выполнены работы по определению персональных данных каждого МЭ установки. Наиболее сложной и трудоемкой задачей получения экспериментальных данных является определение персонафицированных значений коэффициентов аппроксимации α и β . Далее, при помощи расчетной программы ИП-РО (разработчик АО «НПК Медиана-Фильтр») было проведено моделирование и определение оптимальной компоновки мембран.

Это позволило сконфигурировать мембраны в корпусах таким образом, что удалось добиться симметричности потоков, перепадов давлений. Было достигнуто оптимальное значение производительности, селективности с учетом гидравлических характеристик внутри одного каскада. Результаты приведены в таблице 3.2. Персональные характеристики МЭ после проведения процедуры персонификации приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.2

Значения производительности и селективности шести корпусов в одном каскаде ДВС-М/150-8-54 после определения персональных характеристики МЭ

№ корпуса	Производительность по фильтрату, м ³ /ч	Селективность, %	Солепропускание, % (степень очистки)
1	6,1	98,16	1,84
2	6,2	98,11	1,89
3	6,1	98,29	1,71
4	6,0	97,98	2,02
5	6,1	98,14	1,86
6	5,9	98,20	1,8

Стоит отметить, что аналогичные мероприятия также были успешно выполнены на ТЭЦ-21 Мосэнерго. Проведение работ по персонификации рабочих характеристик были связаны с необходимостью замены исчерпавших ресурс мембран на новые материалы производства «РМ Нанотех». Компоновка проводилась так же при определении персональных характеристик мембран.

Таблица 3.3

Результаты определения персональных характеристик мембранных элементов обратноосмотической установки

ДВС-М/150-8-54

№ МЭ	Температура исходной воды T , °С	Давление исходной воды $P_{исх}$, атм	Перепад давления на мембране ΔP , атм	Расход пермеата $Q_{пер}$, м ³ /ч	Расход концентрата $Q_{конц}$, м ³ /ч	Электропроводность исходной воды $\chi_{исх}$, мкСм/см	Электропроводность пермеата $\chi_{пер}$, мкСм/см	Селективность S , %
1.	20	7,1	0,4	1,08	9,2	946	14,8	98,44
2.	20	7,2	0,4	1,14	9	952	14,9	98,43
3.	20	7	0,3	1,20	9,1	949	15,86	98,33
4.	20	7,1	0,4	1,20	9,4	938	14,74	98,43
5.	20	7,2	0,4	0,96	9,4	942	12,82	98,64
6.	20	7,1	0,4	1,02	9,5	947	16,82	98,22
7.	20	7,1	0,4	0,90	9,6	956	16,94	98,23
8.	20	7,2	0,4	1,02	9,4	962	14,02	98,54
9.	20	7	0,3	1,08	9,4	958	15,97	98,33
10.	20	7,1	0,4	1,08	9,4	946	13,85	98,54
11.	20	6,9	0,3	0,96	9,4	951	14,89	98,43
12.	20	6,9	0,3	1,08	9,2	944	15,79	98,33
13.	20	7,1	0,4	1,02	9,5	939	14,75	98,43
14.	20	7,1	0,3	1,08	9,3	944	16,84	98,22
15.	20	7	0,3	1,08	9,3	955	16,93	98,23
16.	20	7	0,3	1,08	9,2	957	16,96	98,23
17.	20	7,2	0,4	1,14	9	956	13,96	98,54
18.	20	7,2	0,5	1,20	9	951	15,88	98,33
19.	20	7,1	0,4	1,02	9,5	942	14,82	98,43

№ МЭ	Температура исходной воды T , °С	Давление исходной воды $P_{исх}$, атм	Перепад давления на мембране ΔP , атм	Расход пермеата $Q_{пер}$, м ³ /ч	Расход концентрата $Q_{конц}$, м ³ /ч	Электропроводность исходной воды $\chi_{исх}$, мкСм/см	Электропроводность пермеата $\chi_{пер}$, мкСм/см	Селективность S , %
20.	20	7,1	0,3	1,08	9,3	936	13,74	98,53
21.	20	7	0,3	1,02	9,3	924	14,57	98,42
22.	20	7,1	0,4	0,96	9,5	945	14,75	98,44
23.	20	7,2	0,5	1,08	9,2	954	16,92	98,23
24.	20	7,2	0,4	1,08	9,2	958	16,97	98,23
25.	20	7	0,3	1,08	9,3	914	13,49	98,52
26.	20	7,1	0,4	1,02	9,4	907	15,31	98,31
27.	20	6,9	0,3	0,96	9,4	921	13,57	98,53
28.	20	7	0,4	1,08	9,1	908	14,38	98,42
29.	20	7,1	0,4	0,96	9,5	972	16,16	98,34
30.	20	7,1	0,3	1,08	9,3	962	15,02	98,44
31.	20	7,2	0,5	1,02	9,5	958	14,98	98,44
32.	20	7,1	0,4	1,08	9,3	954	11,95	98,75
33.	20	7,1	0,3	1,08	9,2	947	13,86	98,54
34.	20	7,1	0,4	1,14	9,1	938	13,76	98,53
35.	20	7	0,3	1,20	9,2	946	14,83	98,43
36.	20	7	0,3	1,08	9,3	939	15,73	98,32
37.	20	7,2	0,5	1,08	9,2	958	14,98	98,44
38.	20	7,2	0,4	1,14	9,1	947	14,84	98,43
39.	20	7,1	0,4	1,20	9,2	951	14,92	98,43
40.	20	7,1	0,4	1,20	9,4	945	13,85	98,53
41.	20	7	0,4	0,96	9,5	954	13,93	98,54
42.	20	7,1	0,5	0,89	9,6	946	14,83	98,43

№ МЭ	Температура исходной воды T , °С	Давление исходной воды $P_{исх}$, атм	Перепад давления на мембране ΔP , атм	Расход пермеата $Q_{пер}$, м ³ /ч	Расход концентрата $Q_{конц}$, м ³ /ч	Электропроводность исходной воды $\chi_{исх}$, мкСм/см	Электропроводность пермеата $\chi_{пер}$, мкСм/см	Селективность S , %
43.	20	7,2	0,5	0,90	9,4	958	12,98	98,65
44.	20	7,2	0,4	1,02	9,3	954	16,92	98,23
45.	20	7	0,3	1,08	9,4	947	16,82	98,22
46.	20	7,1	0,4	1,02	9,4	938	14,76	98,43
47.	20	6,9	0,1	0,96	9,4	946	15,82	98,33
48.	20	7,1	0,4	1,08	9,3	939	15,77	98,32
49.	20	7,1	0,4	1,02	9,3	958	14,98	98,44
50.	20	7	0,3	1,08	9,2	947	15,83	98,33
51.	20	7,1	0,4	1,08	9,2	951	14,89	98,43
52.	20	7,2	0,4	1,08	9,3	954	14,93	98,44
53.	20	7,2	0,3	1,14	9,2	946	11,87	98,75
54.	20	7,1	0,4	1,20	9,1	958	13,98	98,54

T – температура, раствора в процессе эксперимента,

$P_{исх}$ – давление на входе в мембранный элемент,

ΔP – перепад давления на мембранном элементе,

$Q_{пер}$ – расход фильтрата мембранного элемента,

$Q_{конц}$ – расход концентрата,

$\chi_{исх}$ – электропроводность исходного раствора,

$\chi_{пер}$ – электропроводность фильтрата мембранного элемента,

S – селективность мембранного элемента.

Представленная установка может быть использована не только для тестирования мембран, но и для проведения пилотных испытаний. В ходе проведенной работы на данной установке, были выполнены испытания МЭ с последующей консервацией на базе тестовых растворов. При проведении тестовых испытаний на стенде, необходимо принимать во внимание, в каких условиях происходит поставка потребителю МЭ, хранение и ввод в эксплуатацию.

3.1. Определение времени стабилизации рабочих параметров мембранных элементов

Следует учитывать, что новые мембранные элементы имеют характерное время T_{cm} выхода на стабильные рабочие параметры. Наличие зависимости от времени производительности и селективности новых обратноосмотических МЭ связано с особенностями их строения и производства. Среди наиболее важных выделим две основные причины. Первая – *структурная*: селективный слой в МЭ наносится на распределительную ультрафильтрационную мембрану, как правило, из полисульфона. Под воздействием достаточно высокого давления происходит ее сжатие, изменение геометрии пор и, как следствие, возрастает гидравлическое сопротивление [109-110]. Производители обратноосмотических МЭ выпускают продукцию (идентичные МЭ) в двух состояниях: сухом и мокрым. Для сухих мембран тестирование производится по протеканию газовых сред, а для мокрых – на модельных растворах. В последнем случае после тестирования производится консервация МЭ. Отмывка от консерванта занимает значительное время. Эти обстоятельства являются определяющими для значений T_{cm} . Был проведен ряд экспериментов на новых МЭ для определения T_{cm} . На рисунках 3.4-3.5 представлены зависимости изменения электропроводности и производительности МЭ от количества измерений (несколько раз в сутки).

Тестирование проводилось на исходной воде с солесодержанием 2 г/л, давление подачи на УОО 16 бар, температура 25°C.

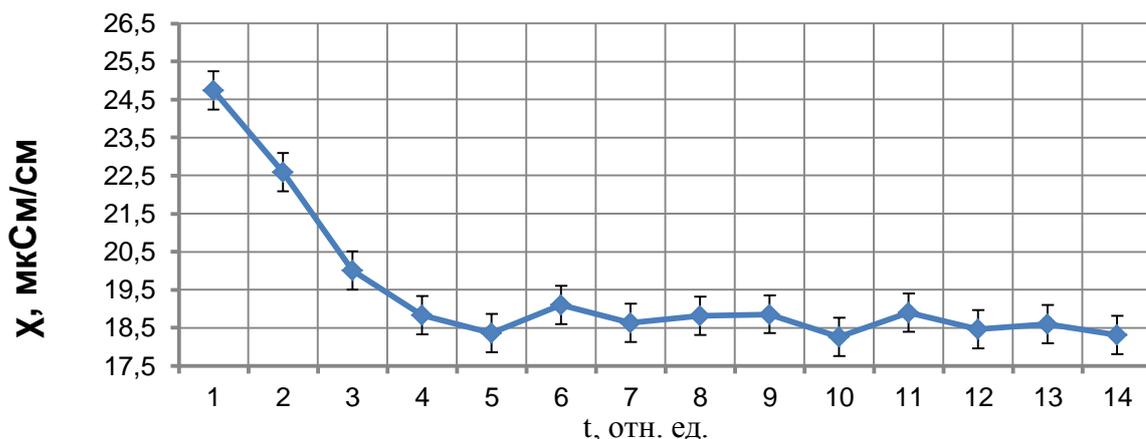


Рисунок 3.4. Зависимость электропроводности МЭ 8'' от времени фильтрации

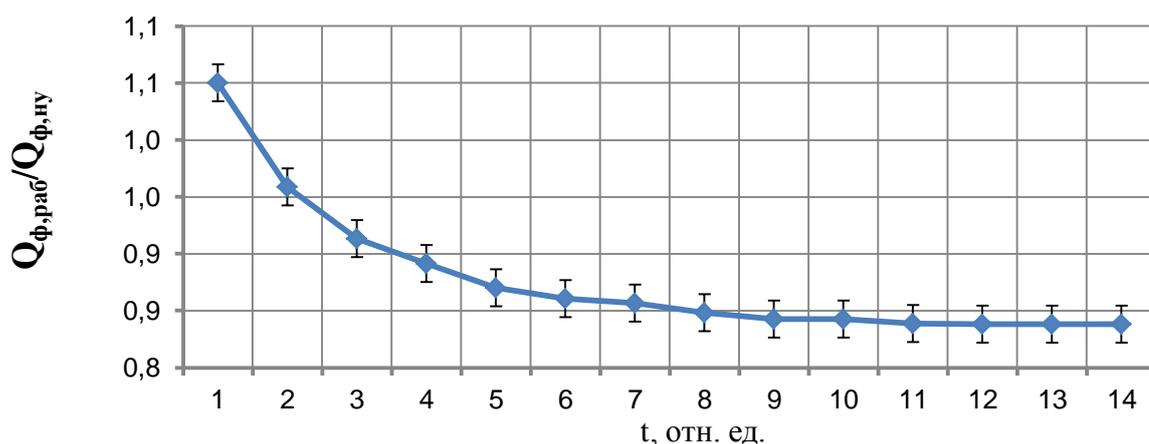


Рисунок 3.5. Зависимость отношения производительности МЭ фактической к теоретической от времени фильтрации (по пермеату)

Из вышеприведенных графиков видно, что время выхода на рабочие параметры мембранного элемента значительное. Его абсолютное значение зависит от производственных особенностей, условий заводского тестирования («сухое», «мокрое»). Как правило $T_{см}$, это десятки часов: 20-30 и более. За это время происходит стабилизация производительности и селективности (СПС) мембраны. Для случая сухой мембраны, отвечающей условиям вышеприведенного эксперимента, время стабилизации электропроводности фильтрата (или селективности МЭ) было примерно в

два раза меньше времени стабилизации производительности МЭ. Для «мокрых» мембран эти времена отличаются незначительно. Как видно, из графиков, приведенных на рисунках 3.4-3.5, имеет место значительное улучшение селективности МЭ – солепропускание уменьшается почти на 30%, производительность уменьшается более чем на 20%.

Были выполнены эксперименты по определению $T_{см}$ для различных типов мембранных элементов – для солоноватых вод (тестовое давление $P_{тест}$ – 16 атм), низконапорных ($P_{тест} = 10$ атм), ультранизконапорных ($P_{тест} \approx 7$ атм) и для морских мембран с $P_{тест}$ – 30 атм. Результаты экспериментов показали, что различие значения $T_{см}$ для различных типов может достигать 50%.

Для трех различных производителей МЭ одного высоконапорного типа (тестовое давление $P_{тест} = 16$ атм) определялось время стабилизации $T_{см}$, различие значений $T_{см}$ в этом случае не превысило 10%.

3.4. Выводы по главе

1. Исследование компоновки мембранных элементов в установках обратного осмоса показало, что имеется заметный разброс персонафицированных данных обратноосмотических мембранных элементов, который, как правило, укладывается в паспортные данные заводов производителей. Показано, что эти различия могут приводить к существенному перекосу потоков работы установки обратного осмоса с большим числом элементов.

2. Представлен метод оптимизации компоновки обратноосмотических элементов на основе экспериментальных испытаний и расчетной обработки полученных данных, позволяющий минимизировать влияние разброса персональных характеристик мембранных элементов на производительность и качество пермеата.

3. Процедура определения персональных характеристик позволяет сбалансировать потоки в мембранной установке и, таким образом, получить

устойчивую в гидравлическом отношении установку обратного осмоса. Получение же оптимальных параметров по рабочему давлению и селективности установки требует проведения расчетов с учетом эмпирических коэффициентов.

4. Показано, что перед инсталляцией мембранных элементов в корпус или перед проведением основных экспериментов, необходимо стабилизировать рабочие параметры новых мембранных элементов. Экспериментальные исследования показали, что время стабилизации рабочих параметров новых мембранных элементов с точностью до 10% одинаково для одного типа элементов.

ГЛАВА 4. ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ МЕМБРАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСТАНОВКАХ ОБРАТНОГО ОСМОСА

4.1. Анализ стандартных подходов к проведению химической очистки установок обратного осмоса

Мембранные технологии и метод обратного осмоса являются существенной частью как систем водоподготовки, так и систем очистки стоков.

Стабильность работы установок обратного осмоса связана с качеством подготовленной воды [20, 90, 99]. При надлежащей предварительной подготовке исходной воды, установки способны длительный срок (месяцы) работать без существенного снижения качества пермеата и производительности.

Одним из главных факторов, влияющих на стабильность, эффективность и продолжительность работы мембран, является их загрязнение неорганическими, органическими и биологическими отложениями. Организация и проведение операции удаления этих отложений является обязательным для всех работающих мембранных установок.

Процедура очистки обратноосмотических установок является неотъемлемой частью технологии обратного осмоса: особенно важной она является в условиях изменяющегося качества исходной воды, нестабильной работы системы предподготовки, а также в системах очистки стоков, в многоступенчатых системах обратного осмоса, работающих с высококонцентрированными растворами.

Большинство имеющихся подходов к реализации процедуры химической очистки основаны на общих методиках, применении узкого круга очищающих реагентов. Конкретный выбор технологии очистки для заданных условий эксплуатации УОО определяется эмпирическим способом. Процедура подбора технологии для большой обратноосмотической системы

в условиях крупного промышленного предприятия (ТЭЦ, ГРЭС, нефтехимическое производство, заводы минеральных удобрений и т.п.) является достаточно трудоёмкой и дорогостоящей задачей.

Данная глава посвящена разработке методических указаний по оперативной и эффективной организации выбора параметров химической очистки для установок обратного осмоса.

Вещества, загрязняющие поверхность мембран условно делятся на три типа:

- неорганические (минеральные отложения);
- органические;
- биологические (возникающие в результате жизнедеятельности микробиоты воды).

Для каждого из этих загрязнений разработаны и продолжают совершенствоваться технологии очистки от загрязнений. Они основываются на применении очищающих растворов, которые могут быть разделены на три основных класса:

- кислые (рабочий диапазон $\text{pH} \approx 1-5$);
- щелочные (рабочий диапазон $\text{pH} \approx 10-13$);
- обеззараживающие.

Очистка мембранных элементов в УОО обычно осуществляется с помощью специальной установки – станции химической очистки (СХО). Основное технологическое оборудование этой установки включает: емкость, насос, подогреватель моющего раствора, микрофльтрация на картриджных фильтрах с рейтингом 5 мкм, а также приборы КИПиА (расходомеры, датчики давления, рН-метр, регулятор температуры и др.).

При химической очистке рекомендуется, чтобы поток через мембранный элемент ($Q_{\text{ХО}}^{\text{НОМ}}$) не превышал 50-60% от максимально допустимого значения потока ($Q_{\text{раб}}^{\text{max}}$) через мембранный элемент (паспортное значение).

Схема и внешний вид станции химической очистки представлены на рисунке 4.1.

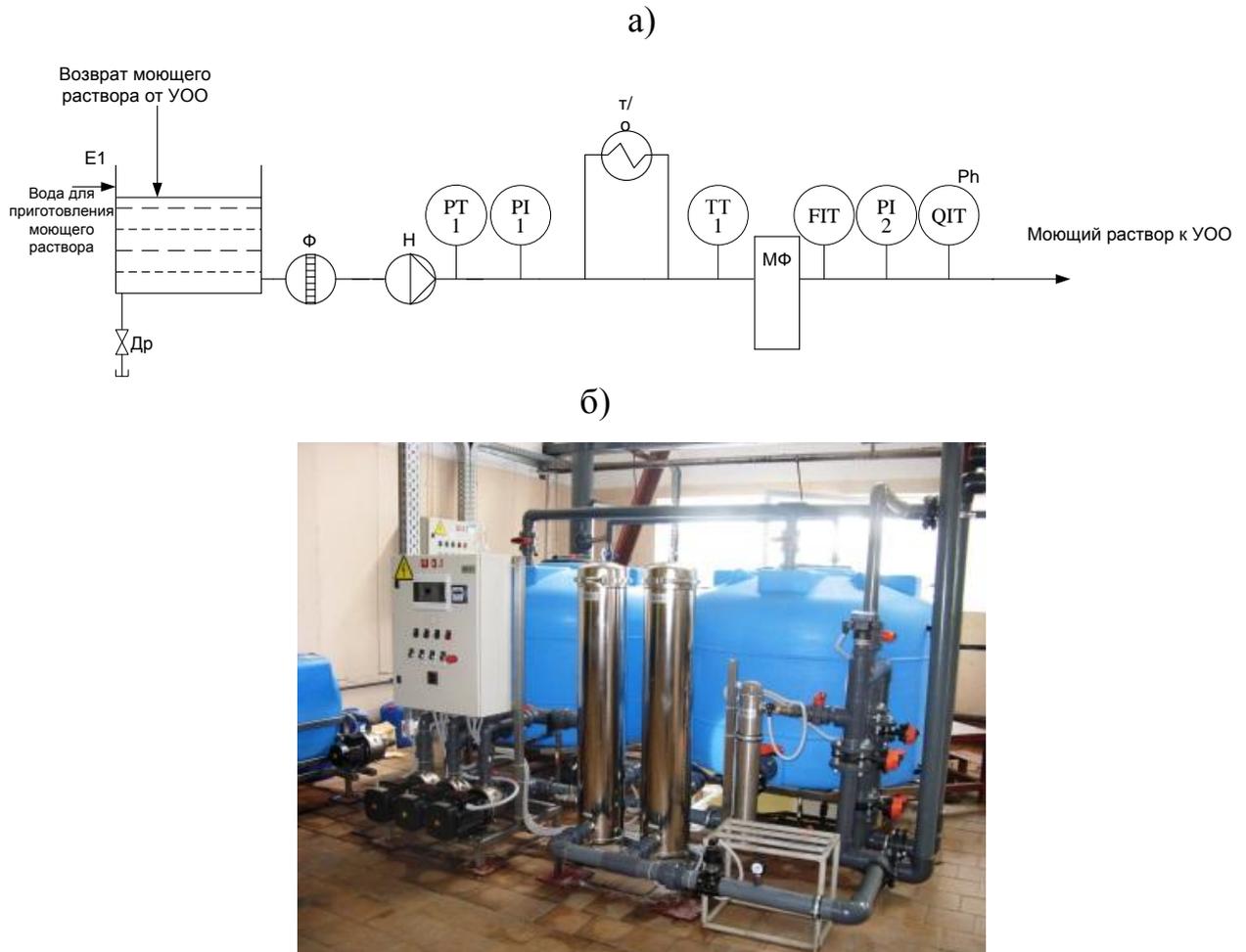


Рисунок 4.1. Станция химической очистки: а) – схема, б) – внешний вид

Стандартный цикл очистки включает в себя следующие операции:

- приготовление моющего раствора с рекомендуемыми параметрами по концентрации химических реагентов, рН раствора, температуре очистки $t_{оч}$;
- введение раствора в мембранную систему. Она осуществляется при низких расходах и малом рабочем давлении;
- медленная циркуляция раствора с небольшим расходом $Q_{мр}$ в течение промежутка времени $\tau_{мр}$;
- замачивание на промежуток времени $\tau_{зм}$. Для эффективной очистки требуется поддержание стабильного рН и температуры $t_{оч}$. Для этого

целесообразно осуществлять очень медленную фоновую циркуляцию с потоком $Q_{\text{фрец}}$ непрерывно или периодически;

- рециркуляция со скоростью потока $Q_{\text{рц}} \sim Q_{\text{хо}}^{\text{НОМ}}$ в течение времени $\tau_{\text{рц}}$. Эта операция обеспечивает вымывание загрязнений, сцепление которых с поверхностью мембраны было ослаблено моющим раствором $Q_{\text{хо}}^{\text{НОМ}}$;
- удаление очищающего раствора из мембранной установки. Для этой операции рекомендуется использовать пермеат обратного осмоса или глубоко обессоленную воду.

Вышеописанный цикл относится к одному виду моющего раствора.

При необходимости этот цикл может быть повторен.

Установки химической очистки должны обеспечивать эффективное выполнение вышеописанных операций, иметь возможности для обеспечения требуемых условий очистки: регулирование потоков очищаемого раствора, значений его температуры и pH.

4.2. Определение основных технологических задач проведения процедуры химической очистки

Для организации эффективной очистки мембранных элементов в УОО требуется:

- Определить преимущественный состав загрязняющих веществ, отложений на мембранных элементах;
- Подобрать оптимальные очищающие растворы;
- Определить порядок очистки для выбранных типов растворов;
- Определить рабочие параметры цикла очистки ($t_{\text{оч}}$, $Q_{\text{мр}}$, $Q_{\text{фрец}}$, $Q_{\text{хо}}^{\text{НОМ}}$, $\tau_{\text{зм}}$, $\tau_{\text{мр}}$, $\tau_{\text{рц}}$) и число их повторений.

Решение этих задач является достаточно трудоемким занятием, а в условиях промышленной установки осложнено как организационными, так и техническими проблемами (сложная конструкция, большой расход реагентов).

Определение состава и количества загрязняющих веществ можно производить следующими методами:

- анализ исходной воды и прогнозирование возможных загрязнений;
- визуальный осмотр торцов мембранных элементов;
- замачивание в кислых растворах и химический анализ полученного промывного раствора;
- взвешивание мембранного элемента, для оценки интенсивности загрязнения;
- анализ отложений на картриджных микрофилтрах; разборка (вскрытие) мембранного элемента и прямой анализ отложений (ПАО) с поверхности мембраны.

Из всех вышеуказанных методов только последний даёт непосредственную информацию о составе и интенсивности отложений. На рисунке 4.2 представлены разобранный рулонный мембранный элемент и процедура вырезания мембраны для дальнейшего анализа отложений.



Рисунок 4.2: а) – разобранный обратноосмотический мембранный элемент, б) – процедура вырезания мембранного селективного слоя

Остальные методы позволяют сделать только косвенные выводы и в целом понять характер отложений. Прямой анализ отложений включает:

- визуальный контроль;
- физико-химический анализ соскобов;

- микробиологический анализ соскобов.

К сожалению, процедура ПАО требует вскрытия мембранного элемента, что является затратным и неудобным мероприятием.

Таким образом, возникает вопрос о нахождении экономической эффективной и достаточно простой технологии для определения основных параметров химической очистки.

4.3. Система локального мониторинга загрязнений установок обратного осмоса

Мембранный блок промышленной установки обратного осмоса имеет неоднородное, широкое распределение концентраций растворенных веществ и соответственно, загрязняющих веществ. Эти обстоятельства обусловлены отбором пермеата из исходной воды, в результате происходит заметное концентрирование исходной воды по мере ее движения в обратноосмотических модулях [102-103, 127]. Это является причиной различных типов загрязнений в ООУ и определяет неоднородность их интенсивности [104, 105].

Для организации эффективной очистки полезной является информация о распределении загрязнений (состав, интенсивность отложений) в линии исходной воды и концентрата мембранных элементов. Для решения этой задачи предлагается установить вдоль линии потока воды пробные фильтрующие модули (ПФМ). Схема подключения представлена на рисунке 4.3.

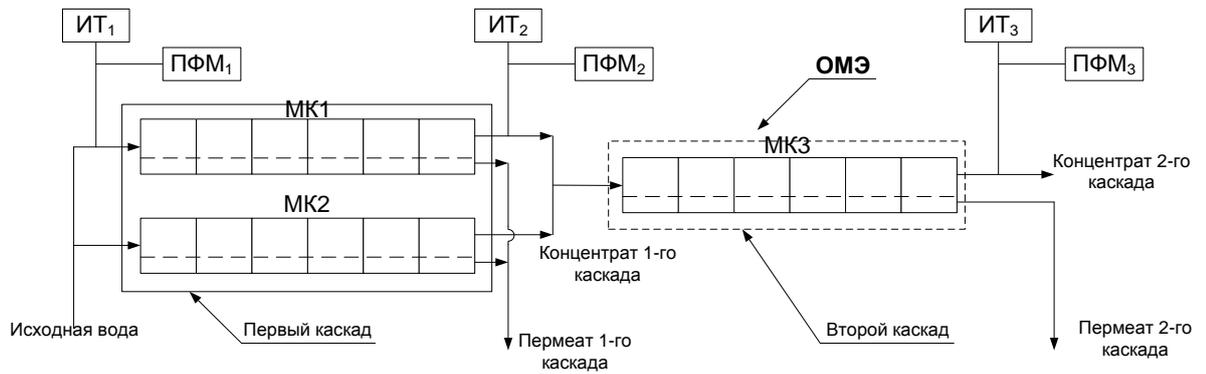


Рисунок 4.3. Схема подключения пробных фильтрующих модулей

Обычно промышленные УОО имеют два-три каскада (на рисунке 4.3 изображено два каскада). Каждый каскад состоит из нескольких корпусов высокого давления с 4÷7 мембранными элементами в каждом. Предлагается устанавливать ПФМ на входе в установку и на выходе линии концентрата каждого каскада. Обозначим их измерительными точками: ИТ₀, ИТ₁, ИТ₂ и т.д.

4.3.1. Требования к пробным фильтрующим модулям

Пробные фильтрующие модули должны обеспечивать одинаковый с промышленной установкой уровень загрязнения мембран в заданной ИТ. Параметры загрязнения мембран определяются:

- Физико-химическими и микробиологическими характеристиками воды (П1);
- Долей отбора фильтрата r (П2);
- Проницаемостью мембраны, т.е. ее удельной производительностью и трансмембранным давлением Δp_{TM} (П3);
- Индивидуальными характеристиками мембраны и конструкции мембранного элемента (П4).

Доля отбора фильтрата определяет степень концентрирования загрязнителей в заданной ИТ, т.е. изменение параметра П1 относительно состава исходной воды, и гидравлические потоки. Параметры (П2) и (П3) определяют важнейшие физические параметры фильтрования:

тангенциальную (v_τ) и нормальную (v_n) составляющие линейной скорости потока [97].

Условия работы ПФМ должны соответствовать эксплуатационным характеристикам мембранных элементов, наиболее важной характеристикой, в исследуемой ИТ, является скорость потока над мембраной v_τ . Трансмембранное давление определяет скорость перпендикулярного потока в мембранном модуле – v_n , которая не превышает 0,01 мм/с. Это значение в 10^5 раз меньше типичной линейной скорости потока над мембраной УОО, $v_\tau \sim 1$ м/с. Таким образом, именно значение линейной скорости вдоль мембраны определяет динамику отложений на поверхности мембран. Соответственно, вклад потока, который определяется трансмембранным давлением, мал. Это означает, что при проведении исследований, допустимо уменьшение трансмембранного давления на ПФМ по сравнению с промышленной УОО. Для промышленных установок Δp_{TM} обычно составляет 10-18 атм, для ПФМ на мембранах типоразмера 1812 приемлемым является давление 8-10 атм. При этом в большинстве случаев Δp_{TM} на ПФМ ниже не более чем на 30-50%, чем на промышленной ООУ. Таким образом, основным параметром которому должны соответствовать рабочие условия ПФМ в данной ИТ является скорость потока над мембраной.

Другим важным требованием к конструкции ПФМ является сопоставимость рабочей конструкции мембранного элемента в ПФМ и промышленного мембранного элемента. Это означает, что в качестве ПФМ не может быть использована стандартная лабораторная фильтровальная ячейка, которая используется для исследования обратноосмотических процессов. Это связано с тем, что она не содержит дренажной разделительной сетки, что существенно образом влияет на гидродинамику потоков и распределение отложений на мембранах. В качестве наиболее рационального кандидата на ПФМ может быть предложены мембраны типа 1812, которые широко распространены для бытовых систем и имеют низкую стоимость. Однако необходимо учитывать, что стандартные бытовые

мембранные элементы могут иметь отличные от используемых в промышленном мембранном элементе тип мембраны. Другими могут быть разделительная и дренажная сетки.

Поэтому при выборе ПФМ на базе мембранного элемента 1812 необходимо удостовериться в сопоставимости их рабочих характеристик с промышленным элементом. Возможность использования стандартных элементов размером 1812, в которых используют, как правило, энергосберегающие низконапорные типы мембран, и которые отличаются от промышленных мембран разделительной и дренажной сетками, в качестве ПФМ, требует дополнительного исследования. Этот вопрос является актуальным, так как производство единичных экземпляров таких элементов с мембранным полотном, разделительной и дренажной сетками, соответствующим промышленным мембранам, по специальному заказу, определяет их высокую стоимость и ограничивает возможность широкого использования.

4.4. Описание технологии моделирования процессов химической очистки

На Новочеркасской ГРЭС в эксплуатации находятся 4 установки обратного осмоса единичной производительностью 50 м³/ч, производитель АО «НПК Медиана-Фильтр» (Россия). Стандартным интервалом проведения процедуры химической очистки для указанного оборудования является 1 раз в 3-4 месяца. Однако, в процессе эксплуатации с каждой химической мойкой стало снижаться общее качество фильтрата, перепады давления по корпусам принимали значения выше нормативных, т.е. стандартные моющие растворы не отмывали мембранные элементы от загрязнений. Качество исходной воды, представленное в таблице 4.1, не характеризовалось содержанием каких-либо специфических соединений, способных негативно повлиять на работу установок.

Анализ исходной воды Новочеркасской ГРЭС

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1.	Солесодержание (общая минерализация), мг/л	716
2.	Жесткость общая, мг-экв/л	9,0
3.	Щелочность, мг-экв/л	3,8
4.	pH	8,44
5.	Железо общее (Fe), мг/л	0,22
6.	Силикаты (по Si), мг/л	6,0
7.	Хлориды (Cl), мг/л	132,0
8.	Сульфаты (SO_4^{2-}), мг/л	262,0
9.	Окисляемость, mgO_2/l	11,5
10.	Взвешенные вещества, мг/л	35,0
11.	Нефтепродукты, мг/л	0,04
12.	Цветность, град	22,0
13.	Мутность, мг/л	27,7

Для оптимизации процесса химической очистки мембранных элементов предлагается следующая технология моделирования процессов очистки:

1. Обратноосмотическая установка комплектуется набором ПФМ $_i^j$. Здесь индекс i отвечает номеру измерительной точки – ИТ $_i$ в гидравлической схеме ООУ. Индекс j означает номер ПФМ в этой точке. В каждой точке рекомендуется устанавливать параллельно несколько ПФМ. Это позволит производить эксперименты с несколькими типами очищающих растворов, а одну из ПФМ подвергнуть разборке. Что существенно ускоряет работу, т.к. время образования отложений составляет несколько недель. Для практической реализации может быть предложена конструкция, изображенная на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4. Фотография ПФМ

2. Оборудование для системы моделирования процессов очистки комплектуется лабораторной установкой химической очистки мембранных элементов. Ее схема аналогична установке химической очистки ООУ. Однако, она не содержит дорогостоящего КИПиА. Предлагаемое возможное техническое решение представлено на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5. Установка химической очистки пробных фильтрующих модулей

3. Потоки через ПФМ_і согласуются с потоками через МЭ в ООУ для данной ИТ_і. Изучение процесса образования отложений целесообразно проводить одновременно с мониторингом состояния МЭ (снижение производительности, изменение качества пермеата и т.п.). Данные следует фиксировать в рабочем журнале.

4. Перед началом эксперимента ПФМ должны проработать на обратноосмотическом пермеате не менее 24 часов. Необходимо произвести взвешивание ПФМ, заполненных водой ПФМ_і, данные записать.

5. После завершения цикла исследования на ООУ необходимо взвесить все ПФМ_{*i*}^{*j*}. Это позволит определить общий вес отложений, и соответственно, их интенсивность. Далее произвести химический и микробиологический анализ отложений.

6. Необходимо разработать программу экспериментов по химической очистке. Программа разрабатывается технологом на основе рекомендованных поставщиком ООУ очищающих растворов. Если обнаружится их низкая эффективность, программа корректируется с применением реагентов других производителей.

7. Программа экспериментов по очистке должна учитывать основные параметры: $t_{оч}$, $Q_{мр}$, $Q_{фрец}$, $Q_{ХО}^{НОМ}$, $\tau_{зм}$, $\tau_{мр}$, $\tau_{рц}$ для каждого типа очищающего раствора. Для того, чтобы иметь возможность изменять эти параметры для данной ИТ_{*i*}, в ней устанавливается несколько ПФМ, их нумерация определяется индексом *j*. Это позволяет существенно сократить время экспериментов, проводить исследования для одинаковых начальных условий загрязнения.

Использование ортофосфорной кислоты, обладающей комплексообразующими свойствами, с внесением корректировок в параметры проведения процесса, показало высокую степень очистки. Одними из основных результатов внедрения данной технологии следует выделить:

- Увеличен межпромывочный интервал оборудования до 6-7 месяцев;
- Качество фильтрата на протяжении фильтроцикла снижается не более чем на 10% от начального значения;
- Перепады давления по корпусам на протяжении фильтроцикла снижается не более чем на 10% от начального значения.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что при соблюдении в дальнейшем таких параметров проведения очистки, ресурс мембран составит

не менее 6-7 лет, тогда как в среднем по отрасли 3-4 года. Результаты проведения работы и корректировка технологии химической очистки позволили снизить потребление реагентов до 15-20%.

4.5. Выводы по главе

1. Для оптимизации технологии химической очистки промышленных установок обратного осмоса предложено применение набора пробных фильтрующих модулей. На основании их использования разработан метод, позволяющий эффективно и экономично определить загрязнения промышленных установок и оперативно подобрать режимы химических очисток мембранных элементов. Метод может быть востребован как, при эксплуатации оборудования, так для предварительных исследований и пилотных испытаний.

2. Результаты апробации показали, что данный метод и используемое технологическое оборудование позволяют существенно сократить время экспериментов и при этом подобрать эффективные моющие растворы с учетом особенностей отложений на поверхности мембран, определить оптимальные параметры циклов очистки. Совокупность приведенных мероприятий на Новочеркасской ГРЭС позволила увеличить фильтроцикл до 6-7 месяцев, ресурс мембран до 2-х раз и сократить эксплуатационные затраты.

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСХОДНОЙ ВОДЫ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА

Значение температуры исходной воды, подаваемой на водоподготовительные установки, должно поддерживаться постоянным и может находиться в диапазоне от 20°C до 40°C. Это позволит получать стабильные параметры работы оборудования и поддерживать стационарность процессов [111-114]. Однако, на практике, зачастую, происходит нарушение режимов и значение температуры может колебаться в различных пределах [122]. Это может быть связано с различными причинами, например:

- Ошибки проектирования водозаборного узла;
- Резкие температурные изменения исходной воды, связанные со сбросами теплых или холодных вод перед водозаборным узлом от других производственных предприятий или климатическими изменениями;
- Нарушения режимов работы теплообменного оборудования;
- Ошибки проектирования система теплообмена;
- Использование промежуточного бакового хозяйства в теплых или неохлаждаемых помещениях (водоподготовительные установки для парогазовых блоков малой производительности);
- Подмес в исходную воду посторонних потоков, например, грязного конденсата с различной температурой;
- Отсутствие теплообменного оборудования на входе в ВПУ.

Поэтому, подбор систем подогрева и теплообменного оборудования и настройка режимов его работы должны проводиться с учетом возможных колебаний значения температуры.

5.1. Основные исследуемые параметры работы установки обратного осмоса

При проектировании опытных и промышленных УОО необходимо учитывать множество параметров и факторов, влияющих на процесс мембранного разделения и работу установки в целом. Влияние каждого из них по отдельности или их совокупности может оказывать различный характер на эксплуатацию системы водоподготовки и, соответственно, на выходные показатели.

Выделим основные исследуемые параметры работы УОО:

1. Физические или гидравлические

▪ гидравлическое сопротивление мембраны:

- начальное (в период наладки оборудования);

- расчетное (принимается при оценочных расчетах постоянным);

- эксплуатационное (может существенно отличаться от начального и расчетного в связи с тем, что в процессе работы на поверхности мембраны образуются отложения и, соответственно, перепад давления увеличивается).

▪ скорость потока над мембраной (удельный съем с единицы поверхности мембраны);

Этот показатель является одним из ключевых при расчете установок обратного осмоса. При расчете в программах не учитывается объемная скорость потока над мембраной. Таким образом, не учитывается изменение скорости с учетом времени, при этом линейная скорость постоянна. От нее также зависит тенденция роста количества отложений на поверхности мембраны и влияние эффекта концентрационной поляризации [115].

2. Качественные показатели:

• селективность (степень очистки)

Этот параметр показывает степень задержания примесей мембраной. Например, при расчетах селективность принимается величиной постоянной, на самом же деле этот параметр изменяется во времени. Связано это с

образованием отложений на поверхности мембраны, что приводит к снижению качества продукта и не восстанавливаемостью их в процессе работы. Также следует учесть, что по различным компонентам селективность отличается.

- расход воды на собственные нужды (проектный показатель – гидравлический КПД)

Этот параметр характеризует степень использования воды. При теоретическом расчете этот параметр закладывается и считается постоянным, на самом же деле расход может колебаться в широком диапазоне в зависимости от настройки установки, может зависеть от требуемой производительности, от качества воды, подаваемой на УОО (эффективности работы предочистки).

3. Эксплуатационные показатели

К эксплуатационным параметрам можно отнести периодичность проведения хим. моек, виды хим. моек, концентрацию дозирования антискаланта, рН при проведении процедуры химической мойки. В общем, это операционная деятельность, выполняемая в период эксплуатации оборудования, которая заключается в определении технических параметров, необходимых для дальнейшей эксплуатации установок.

Отдельно стоит выделить понятие нормализованные показатели, которое определяется как разница между фактическими эксплуатационными параметрами работы и заложенными проектными с учетом изменения исходных данных или с учетом появления факторов, влияющих на рабочие параметры уже в период работы. К нормированным показателям можно отнести расход и солесодержание пермеата, перепад давлений. Например, изменение температуры исходной воды влияет на производительность установки. Но при незначительных колебаниях этого показателя изменение потока пермеата будет незначительным, т.е. установка будет производить нормализованный расход фильтрата.

Формулы для расчета нормализованных параметров:

1) Нормализованный расход пермеата

$$Q_c = \frac{P_{ис} - \frac{\Delta P_c}{2} - P_{иc} - \pi_{икс}}{P_{и0} - \frac{\Delta P_0}{2} - P_{и0} - \pi_{ик0}} \cdot \frac{TCF_c}{TCF_0} \cdot Q_0, \text{ где: } P_{и} - \text{давление подачи исходной}$$

воды; $\frac{\Delta P}{2}$ – половина перепада давления в системе; $P_{п}$ – давление пермеата; $\pi_{ик}$ – осмотическое давление смеси «исходная вода-концентрат»; TCF – температурная поправка; Q – расход пермеата; нижний индекс «с» – стандартные условия; нижний индекс «0» – условия эксплуатации.

2) Нормализованное солесодержание пермеата

$$C_{пс} = C_{п0} \cdot \frac{P_{и0} - \frac{\Delta P_0}{2} - P_{п0} - \pi_{ик0} + \pi_{п0}}{P_{ис} - \frac{\Delta P_c}{2} - P_{пс} - \pi_{икс} + \pi_{пс}} \cdot \frac{C_{икс}}{C_{ик0}}, \text{ где: } C_{п} - \text{концентрация пермеата,}$$

мг/л; $\pi_{п}$ – осмотическое давление пермеата, бар.

3) Перепад давлений на мембранном корпусе (разница между давлением воды на входе в корпус и давлением на выходе из корпуса)

$\Delta P_{МК} = P_{МКВХ} - P_{МКВЫХ}$, где: $P_{МКВХ}$ – давление воды на входе в мембранный корпус, бар; $P_{МКВЫХ}$ – давление на выходе из мембранного корпуса, бар.

5.2. Влияние переменной температуры исходной воды на параметры работы установки обратного осмоса

Одним из главных преимуществ технологии обратного осмоса является получение фильтрованной воды (пермеат) стабильного качества. Но существует ряд факторов, от которых зависят как выходные параметры работы оборудования, так и степень очистки.

Одним из основных показателей качества очищенной воды считается значение ее удельной электропроводности. Измерение электропроводности воды используется для определения степени минерализации воды и оценки эффективности работы водоподготовительного оборудования. Ее значение нормируется в требованиях к обессоленной воде, подаваемой на подпитку котлов ТЭС различных параметров [116-117, 123]. Известно, что

электропроводность растворов электролитов обуславливается движением ионов под действием электрического поля.

С повышением температуры электропроводность увеличивается, так как уменьшение вязкости раствора приводит к увеличению подвижности ионов [118-119]. Увеличение степени диссоциации также может привести к повышению электропроводности. Повышение температуры на 1°С вызывает увеличение электропроводности раствора ориентировочно на 2-2,5%.

Зависимость удельной электропроводности от температуры выражают уравнением:

$\chi_t = \chi_{25} \times (1 + \alpha \times (t - 25) + \beta \times (t - 25)^2)$, где χ_{25} – удельная электропроводность раствора при 25°С; α и β – коэффициенты, зависящие от природы электролита и концентрации; t – текущее значение температуры.

Приведенная зависимость дает наиболее точные результаты расчета в диапазоне $\approx(25\pm 10)^\circ\text{C}$. Стоит отметить, что измерение электропроводности проводится при помощи электронных приборов кондуктометров, имеющих двух- или четырехэлектродную ячейку. Для условий проведения автоматического химического контроля за качеством теплоносителя энергоблоков ТЭС применяется показатель χ_{25} – удельная электропроводность воды, приведенная к стандартной температуре 25°С. Для унификации данных у большинства приборов значение показателя электропроводности приводится уже в пересчете на 25°С [124]. В требованиях к очищенной воде нормируемое значение приводится к 25°С.

5.2.1. Методика проведения экспериментов по изучению влияния переменной температуры на параметры работы установки обратного осмоса

Для проведения опытов использовалась экспериментальная установка обратного осмоса с блоком предварительной очистки (БПО), позволяющая проводить эксперименты по изучению влияния различных факторов на

режимы и параметры ее работы. Внешний вид и схема установки представлены на рисунке 5.1.

Установка состоит из следующих узлов:

- системы предварительной очистки (механическое фильтрование и умягчение);
- системы подогрева исходной воды до заданной температуры;
- мембранного корпуса с мембранным элементом внутри;
- насоса высокого давления;
- комплекта контрольно-измерительных приборов;
- комплекта запорно-регулирующей арматуры;
- система рециркуляции концентрата;
- системы автоматизации на базе программируемого контроллера для управления работой установки;
- системы сбора и хранения очищенной воды;
- блока химической очистки мембран;
- системы дозирования реагентов в трубопровод;
- системы пробоотборных кранов для отбора проб из трубопроводов экспериментальной установки.

Стоит отметить, что установка снабжена системой рециркуляции, позволяющей направлять часть потока концентрата обратно на вход в установку. Установка обратного осмоса рассчитана для работы при давлении до 16 бар, температуре до 45°C и номинальной производительности по очищенной воде 100 л/ч (при 15°C). Вся трубопроводная обвязка выполнена из ПВХ труб.

При проведении опытов в качестве исходной использовалась вода из городского водопровода. Очищенная вода и концентрат после установки сбрасывались в дренаж. При необходимости, увеличение концентрации исходной воды достигалось путем рециркуляции потока концентрата в исходную воду в заданном соотношении.

Во время проведения экспериментов изучалось влияние переменной температуры исходной воды на качество очищенной воды и производительность установки. Гидравлический КПД установки задавался при помощи регулирования потока концентрата. Контур рециркуляции при проведении экспериментов не использовался.

Исходная вода направляется на УОО, предварительно пройдя систему предподготовки (механическая фильтрации и умягчение). При помощи насоса высокого давления поток воды с заданным расходом подается на мембранный блок. После МБ он делится на два потока – пермеат и концентрат, которые направляются в дренаж.

При проведении эксперимента значение расхода контролировалось в следующих точках:

- поток фильтрата;
- поток концентрата.

Значение электропроводности измерялось в исходной воде и фильтрате. Значение температуры исходной воды контролировалось по датчику температуры в трубопроводе перед входом в УОО и датчику, встроенному в электронный кондуктометр.



a)

б)

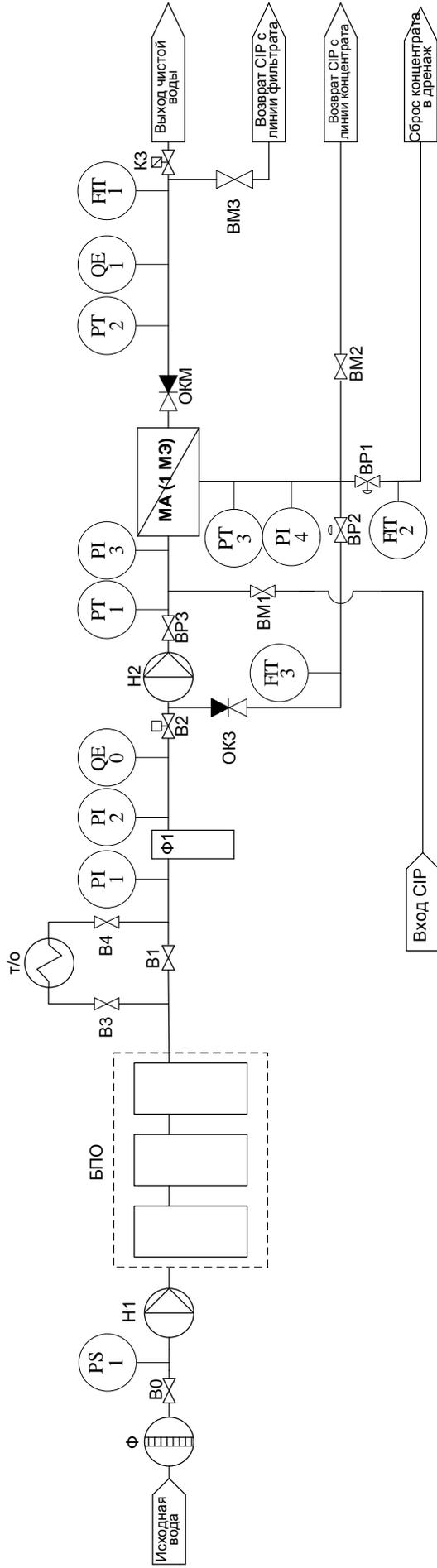


Рисунок 5.1. а) – внешний вид мембранной установки, б) – принципиальная схема экспериментальной системы водоподготовки с мембранной установкой 2540

Установка включает: Ф – сетчатый фильтр, Н1 - насос подкачки, БПО – блок предварительной очистки, T/O – проточный водонагреватель, Ф1 – микрофильтр, Н2 - повышающий насос, МК - мембранный корпус высокого давления на один мембранный элемент 2,5", В0-В5, В0-В5 – регулировочные вентили, PS – реле давления, PT1-PT3 – датчики давления исходной воды, потока фильтрата и концентрата, PI1-PI4 – манометры, FTT1-FTT3 – расходомеры фильтрата, концентрата и потока рециркуляции, QE0-QE1 – кондуктометры входной воды, фильтрата, ОК1-ОК2 – обратные клапаны на линии фильтрата и рециркуляции

Первая часть эксперимента заключалась в нагреве исходной воды при помощи проточного нагревателя и ведения учета выходных параметров работы установки во времени. После включения в работу в течение 15-20 минут установка выводится на рабочие параметры: стабилизируется значение температуры и электропроводности исходной воды, а также значение потоков фильтрата и концентрата. При помощи регулировочных вентилей задается расход концентрата для достижения ожидаемого значения гидравлического КПД. После выхода на стационарный режим фиксируются значения расходов и электропроводности вышеуказанных потоков. Значения электропроводности определялись при помощи электронных кондуктометров Burkert, расход при помощи поплавковых расходомеров GF (калибровка проводилась в начале и завершении опытов при различных значениях температуры). Показания давления до и после мембранного блока и микрофильтров контролировались при помощи электронных датчиков давления и визуально по манометрам.

Далее при помощи проточного нагревателя и датчика температуры был организован постепенный нагрев воды от 9°C до 30°C. В период нагрева фиксировались данные по расходам и электропроводности потоков и сводились в таблицы. Также фиксировалось время, за которое наступал стационарный режим работы установки при новой установившейся температуре.

Таким образом, первый эксперимент был выполнен в двух точках: гидравлический КПД 25% и 50%. Опыты проводились до достижения контролируемых параметров постоянных значений. Во время выполнения эксперимента в первой точке (КПД=50%) при температуре $t_{\text{нач}} = 9^\circ\text{C}$ начальное давление воды на входе в установку было $p_{\text{нач}} = 13,1$ бар, при новом значении температуры $t_{\text{фин}} = 30^\circ\text{C}$ давление снизилось до $p_{\text{фин}} = 12,3$ бар, перепад давления на протяжении всего эксперимента был практически одинаковым и составлял $\Delta p_{\text{МК}} = 0,35 \pm 0,10$ бар. Начальное значение производительности установки по фильтрату и поток концентрата

были равными и составляли $Q_{\text{конц}}^{\text{нач}} = Q_{\text{ф}}^{\text{нач}} = 85 \text{ л/ч}$, по завершении эксперимента количество фильтрата выросло до значения $Q_{\text{ф}}^{\text{фин}} = 152 \text{ л/ч}$ при потоке концентрата $Q_{\text{конц}}^{\text{фин}} = 75 \text{ л/ч}$. При этом, значение электропроводности исходной воды, поступающей на установку увеличилось примерно в 1,6 раза: $C_{\text{исх}}^{\text{нач}} = 380 \text{ мкСм/см}$, $C_{\text{исх}}^{\text{фин}} = 625 \text{ мкСм/см}$. На основании полученных результатов составлены зависимости изменения относительной электропроводности и расхода пермеата от температуры, а также изменение значения фактора концентрирования на протяжении эксперимента, представленные на рисунках 5.2-5.4.

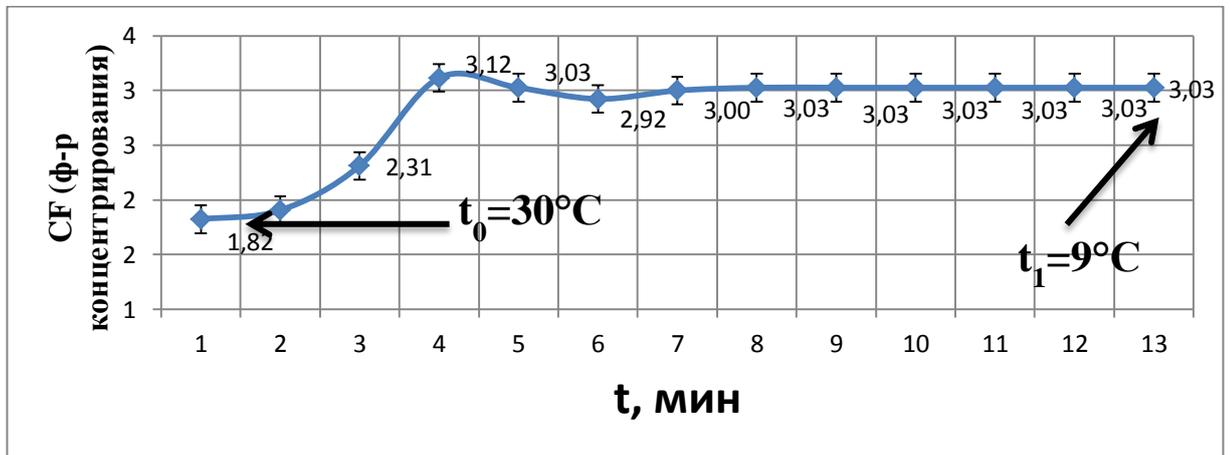


Рисунок 5.2. Зависимость фактора концентрирования от времени нагрева воды при КПД 50%

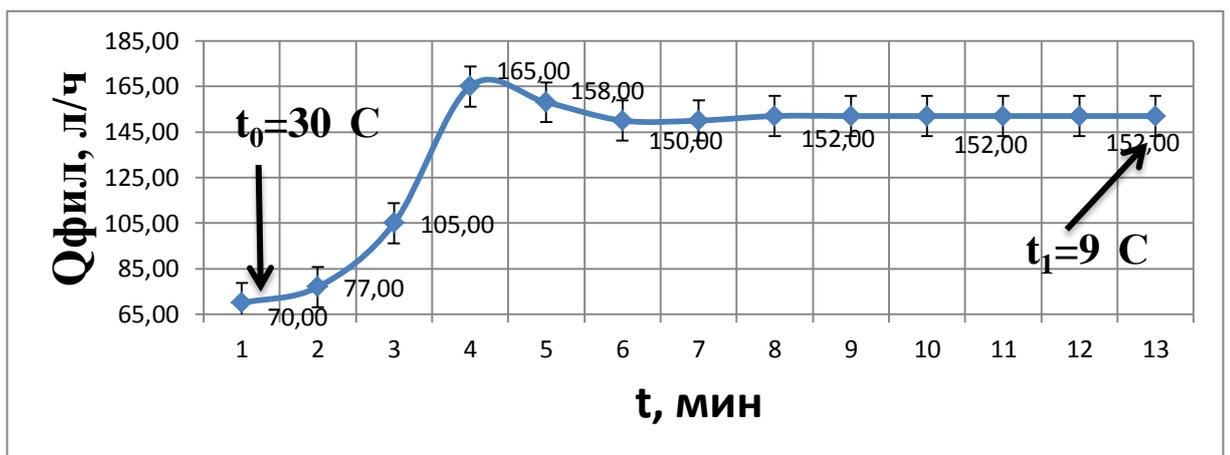


Рисунок 5.3. Зависимость производительности установки по фильтрату от времени нагрева воды при КПД 50%

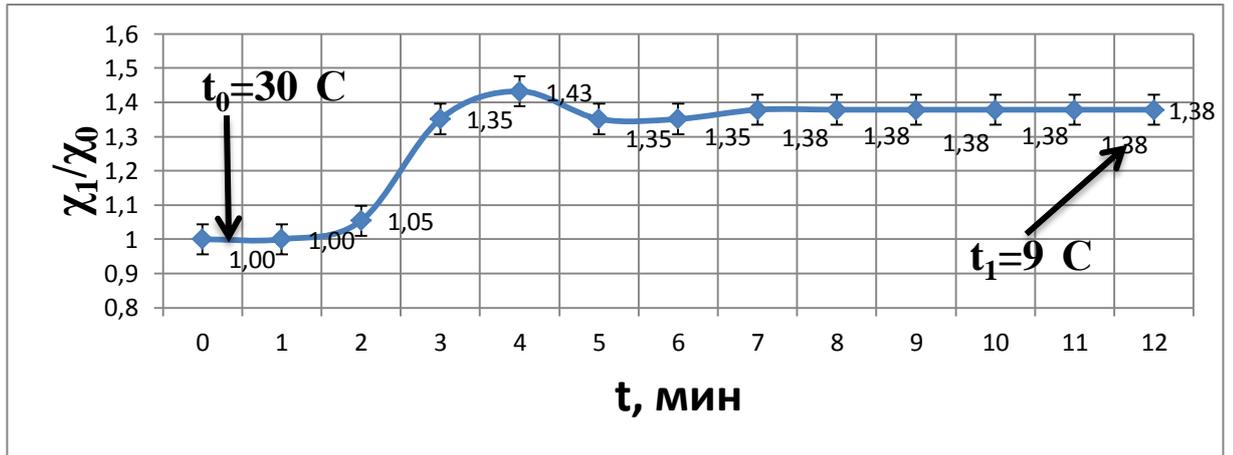


Рисунок 5.4. Зависимость относительной электропроводности от времени нагрева при КПД 50%

Данные при проведении эксперимента во второй точке при КПД=25%:
 $t_{\text{нач}} = 9^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{нач}} = 12,2$ бар, $t_{\text{фин}} = 30^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{фин}} = 11,3$ бар, $\Delta p_{\text{МК}} = 0,35 \pm 0,10$ бар, $Q_{\text{ф}}^{\text{нач}} = 80$ л/ч, $Q_{\text{конц}}^{\text{нач}} = 240$ л/ч, $Q_{\text{ф}}^{\text{фин}} = 135$ л/ч, $Q_{\text{конц}}^{\text{фин}} = 220$ л/ч, $C_{\text{исх}}^{\text{нач}} = 378$ мкСм/см, $C_{\text{исх}}^{\text{фин}} = 570$ мкСм/см. На основании полученных результатов составлены зависимости изменения относительной электропроводности и расхода пермеата от температуры, а также изменение значения фактора концентрирования на протяжении эксперимента, представленные на рисунках 5.5-5.7.

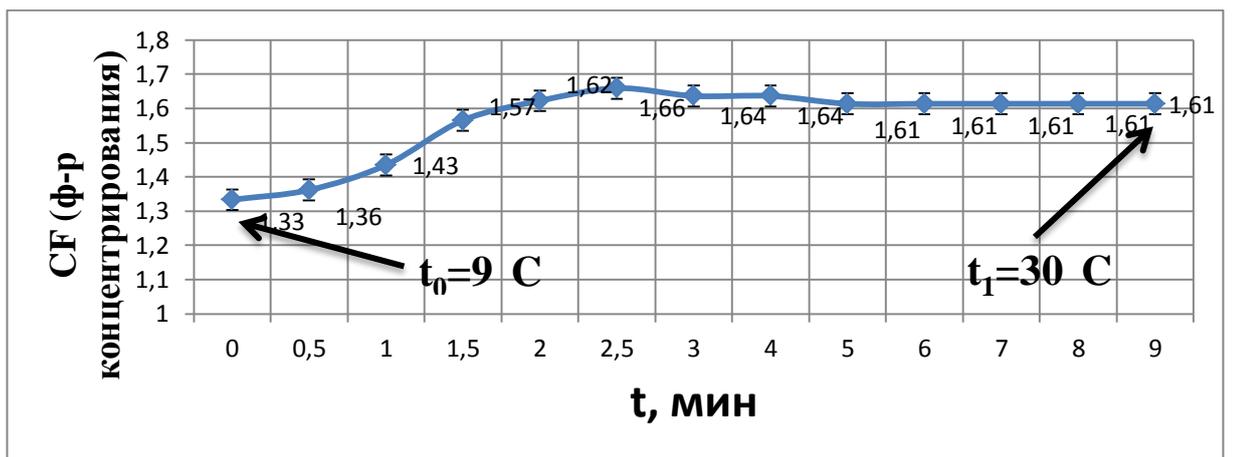


Рисунок 5.5. Зависимость фактора концентрирования от времени нагрева при КПД 25%

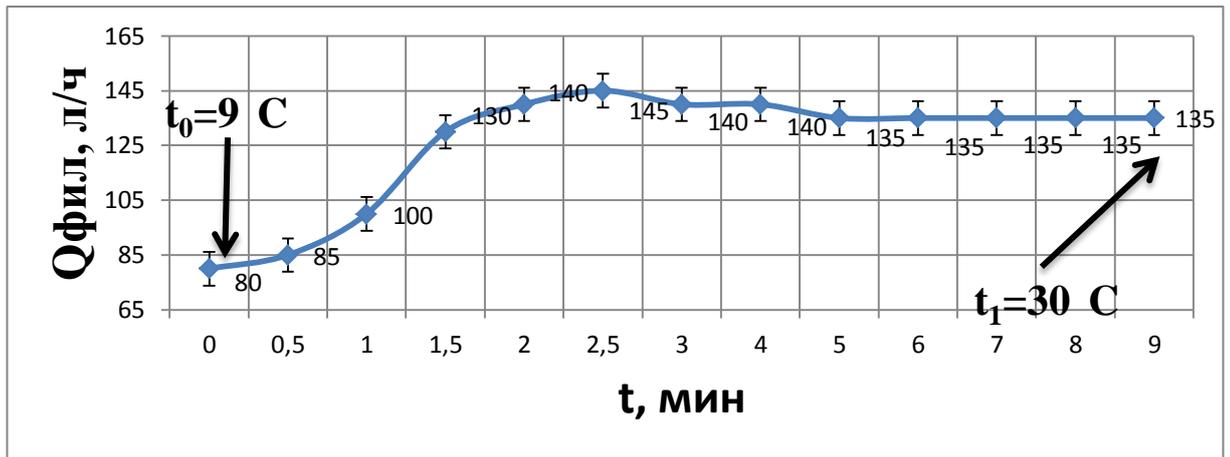


Рисунок 5.6. Зависимость производительности установки по фильтрату от времени при КПД 25%

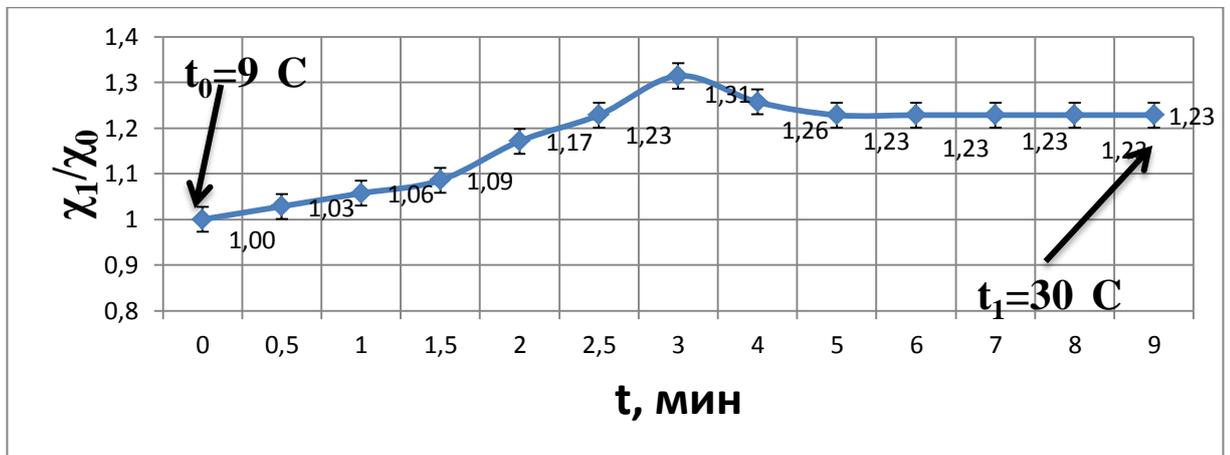


Рисунок 5.7. Зависимость относительной электропроводности от времени нагрева при КПД 25%

Вторая часть эксперимента была аналогична первому, но со снижением температуры от 30°C до 9°C. Эксперимент был выполнен также в двух точках: гидравлический КПД 25% и 50%, без использования системы рециркуляции. Опыты проводились до достижения контролируемых параметров постоянных значений. Во время выполнения эксперимента в первой точке (КПД=50%) при температуре $t_{\text{нач}} = 30^\circ\text{C}$ начальное давление воды на входе в установку было $p_{\text{нач}} = 11,9$ бар, при новом значении температуры $t_{\text{фин}} = 9^\circ\text{C}$ давление снизилось до $p_{\text{фин}} = 12,8$ бар, перепад давления на протяжении всего эксперимента был практически одинаковым и составлял $\Delta p_{\text{МК}} = 0,35 \pm 0,10$ бар. Начальное значение производительности установки по фильтрату и поток концентрата были равными и составляли

$Q_{\text{конц}}^{\text{нач}} = Q_{\text{ф}}^{\text{нач}} = 150$ л/ч, по завершении эксперимента количество фильтрата снизилось до значения $Q_{\text{фил}}^{\text{фин}} = 85$ л/ч при практически неизменном потоке концентрата $Q_{\text{конц}}^{\text{фин}} = 150$ л/ч. При этом, значение электропроводности исходной воды, поступающей на установку снизилось примерно в 1,6 раза: $C_{\text{исх}}^{\text{нач}} = 629$ мкСм/см, $C_{\text{исх}}^{\text{фин}} = 397$ мкСм/см.

Данные при проведении эксперимента во второй точке при КПД=25%:
 $t_{\text{нач}} = 30^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{нач}} = 10,9$ бар, $t_{\text{фин}} = 9^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{фин}} = 11,5$ бар, $\Delta p_{\text{МК}} = 0,35 \pm 0,10$ бар, $Q_{\text{ф}}^{\text{нач}} = 125$ л/ч, $Q_{\text{конц}}^{\text{нач}} = 375$ л/ч, $Q_{\text{ф}}^{\text{фин}} = 73$ л/ч, $Q_{\text{конц}}^{\text{фин}} = 340$ л/ч, $\chi_{\text{исх}}^{\text{нач}} = 580$ мкСм/см, $\chi_{\text{исх}}^{\text{фин}} = 394$ мкСм/см. На основании полученных результатов составлены зависимости изменения относительной электропроводности и расхода пермеата от температуры, а также изменение значения фактора концентрирования на протяжении эксперимента, представленные на рисунках 5.8-5.13.

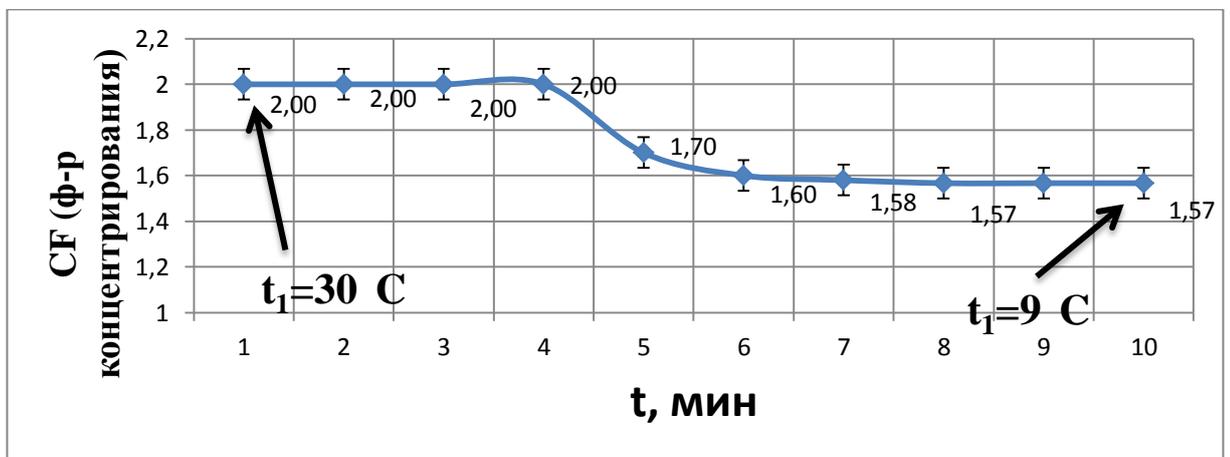


Рисунок 5.8. Зависимость фактора концентрирования от времени охлаждения воды при КПД 50%

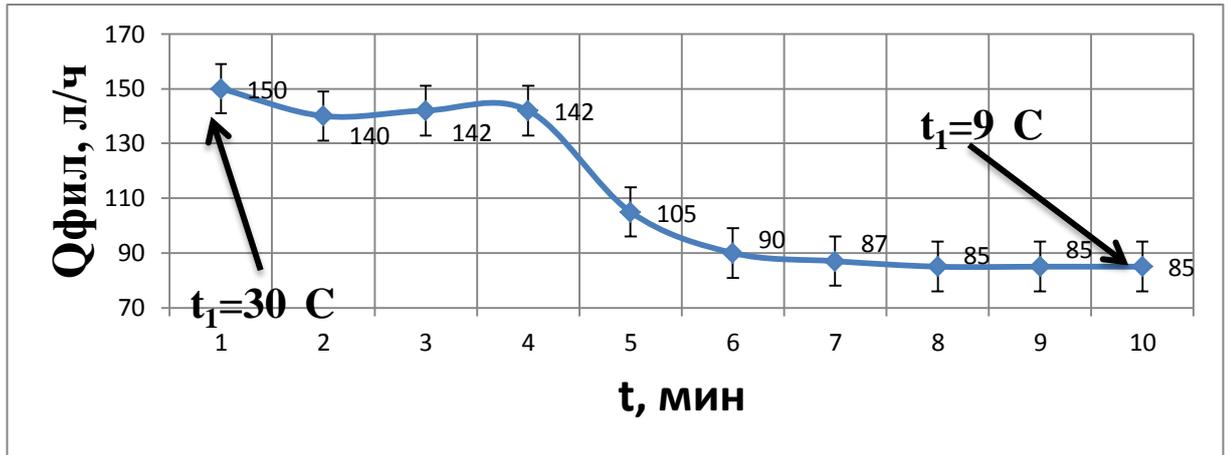


Рисунок 5.9. Зависимость производительности установки по фильтрату от времени охлаждения воды при КПД 50%

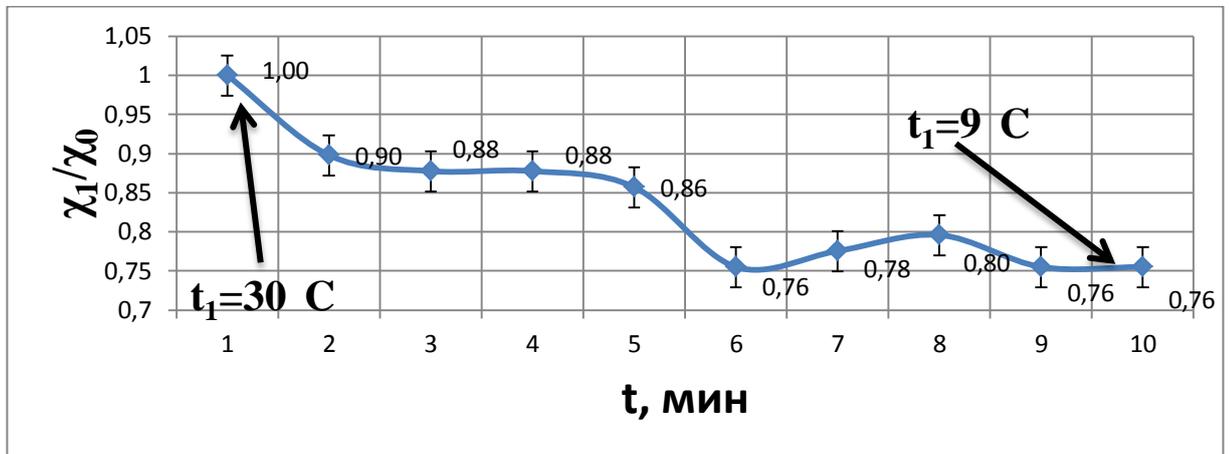


Рисунок 5.10. Зависимость относительной электропроводности от времени охлаждения воды при КПД 50%

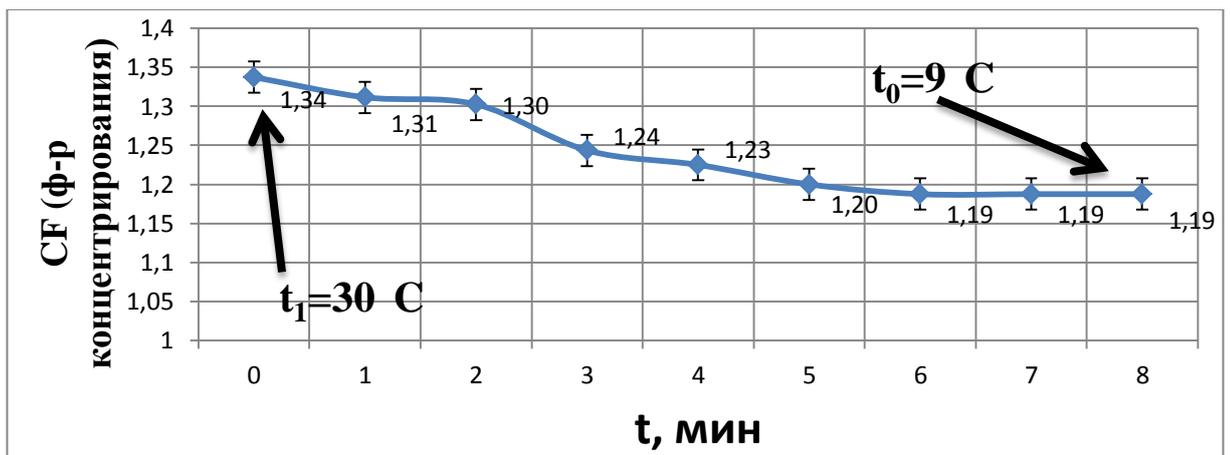


Рисунок 5.11. Зависимость фактора концентрирования от времени охлаждения воды при КПД 25%

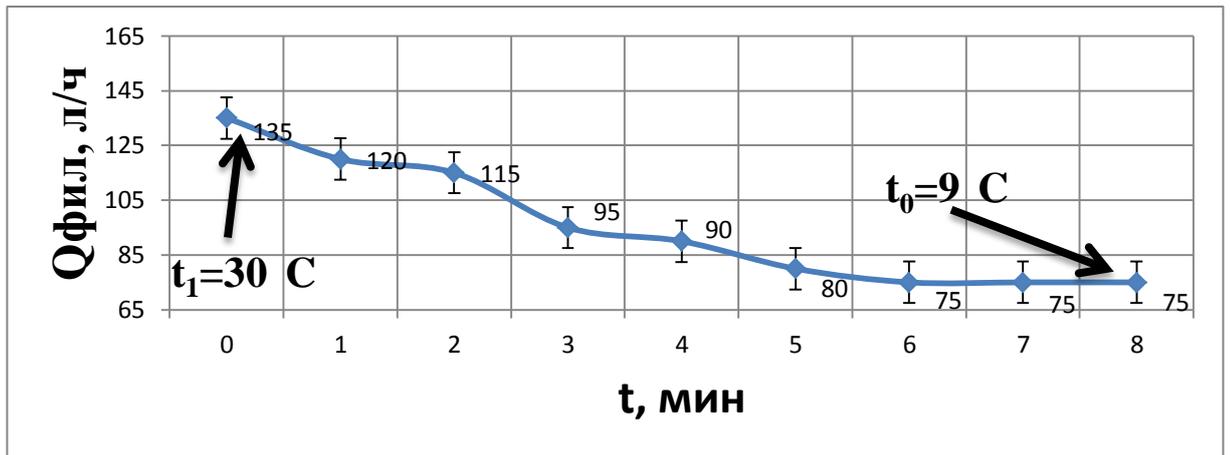


Рисунок 5.12. Зависимость производительности установки по фильтрату от времени охлаждения воды при КПД 25%

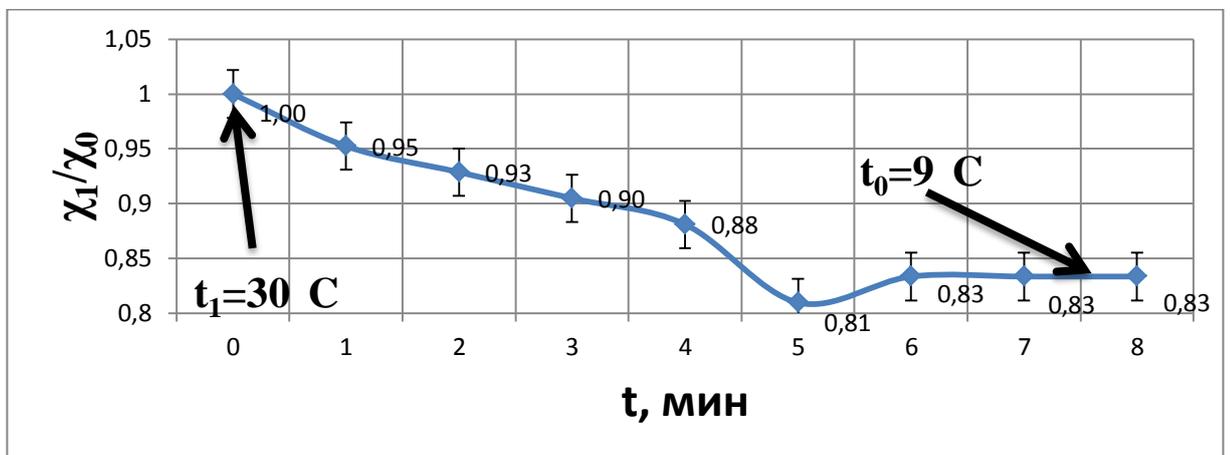


Рисунок 5.13. Зависимость относительной электропроводности от времени охлаждения воды при КПД 25%

Таким образом, анализируя полученные данные в результате первого эксперимента можно сделать следующие выводы: с увеличением температуры исходной воды возрастает производительность установки по фильтрату, а так же значение электропроводности очищенной воды. Учитывая эти данные, следует заметить, что при использовании установок обратного осмоса на производствах, где критично значение электропроводности, необходимо вводить температурную коррекцию, либо в моменты изменения температуры проводить регулировку потоков и настройку режимов. Результаты второго эксперимента показывают, если настройка работы установки проводилась при высоких значениях температуры (30-45°C), а в процессе работы произошло снижение

температуры, то в данной ситуации также необходима регулировка потоков, поскольку качество фильтрата улучшится, а производительность изменится в меньшую сторону.

Все эти процессы связаны с изменением вязкости воды, а также диффузии через мембрану. В свою очередь, работа на установке обратного осмоса ограничена максимальной температурой $+45^{\circ}\text{C}$, что связано с материалом, из которого изготавливают мембраны. При высоких температурах происходит уплотнение полимерных материалов, что в итоге может привести к снижению удельного расхода и увеличению электропроводности фильтрата.

Результаты опытов показывают, что изменение температуры (увеличение/снижение) относительно начальных настроек установки обратного осмоса приводит к изменению электропроводности до $50\div 70\%$, а производительности до $100\div 130\%$. Отметим, что во всех экспериментах речь идет о значении электропроводности приведенной к 25°C . Если же сравнивать изменение электропроводности при определенном значении температуры, то ее изменение может достигать $100\text{-}120\%$ относительно начального значения. В нашем случае максимальное изменение составило в $\approx 2,2$ раза: $\chi_9 = 2,5$ мкСм/см, (приведенное значение $\chi_{25} = 3,7$ мкСм/см), $\chi_{30} = 5,6$ мкСм/см (приведенное значение $\chi_{25} = 5,1$ мкСм/см).

Результаты экспериментов показали, что колебания температуры воды, подаваемой на установку обратного осмоса, приводят к нарушению ее рабочих параметров. Из представленного примера видно, что при снижении температуры исходной воды от 30°C до 9°C электропроводность фильтрата снизилась на 24% от нормализованного значения, а производительность уменьшилась в 2 раза. Этот факт доказывает необходимость использования качественной и надежной системы поддержания температуры для получения стабильных характеристик работы установки. В первую очередь, при проектировании такой системы, обязательным условием является необходимость указания в техническом задании возможного диапазона

изменений температуры исходной воды. Поскольку колебания этого параметра влияют не только на работу установки обратного осмоса, но и всей системы в целом: например, так же нарушается процесс коагуляции, снижается качество очистки. Поэтому, при проектировании оборудования и установок обратного осмоса необходимо учитывать возможные изменения температуры и закладывать коэффициент запаса прочности по электропроводности или производительности, во избежание нарушения режимов. При отсутствии системы подогрева или теплообменного оборудования настройка и корректировка рабочих параметров установки должна проводиться регулярно.

5.3. Влияние рециркуляции концентрата на изменение температуры входной воды и параметры работы установки обратного осмоса

Влияние температуры исходной воды на режимы работы и выходные характеристики установки было изучено в предыдущем разделе. Однако, стоит отметить, что изменение температуры входной воды на УОО может быть связано как с природными факторами (смена времени года, резкое изменение климатических условий), неисправностями теплообменного оборудования, отсутствием термостабилизации, так и с работой внутренних систем установки. Основным возможным фактором, который способен оказать влияние на изменение входной температуры является система рециркуляции. Систему рециркуляции применяют для экономии исходной воды (увеличения гидравлического съема). Однако ее использование приводит к росту солесодержания воды, поступающей на установку, что в свою очередь приведет к снижению качества фильтрата (зависит от расхода потока рециркуляции по отношению к исходному). Был выполнен ряд экспериментов по определению зависимости характеристик УОО от работы системы рециркуляции.

5.3.1. Методика проведения экспериментов по изучению влияния системы рециркуляции на изменение входной температуры, селективность и производительность установки

Испытания проводились на экспериментальной обратноосмотической установке с одной мембраной 2540, которая применялась в предыдущем исследовании (см. рисунок 5.1). Все измерения выполнялись аналогичным путем, как и в прошлых опытах (см. п. 5.2.1.).

В период проведения экспериментов фиксировались данные по расходам и электропроводности потоков и сводились в таблицы. Также фиксировалось время, за которое наступал стационарный режим работы установки при новом значении потока рециркуляции. Контроль значения температуры проводился по датчику температуры, встроенному в кондуктометр входной воды. Фильтрат и концентрат, производимые в результате работы установки сбрасывались в дренаж, т. е. УОО работала на проточной воде.

Перед началом экспериментов установка обратного осмоса настраивается на нужные параметры: устанавливается входное давление в мембранный корпус $p_{\text{ВХ}}^{\text{нач}} = 10$ бар при полностью закрытом вентиле рециркуляции. После установления стационарного режима были зафиксированы основные параметры работы установки: $t_{\text{ВХ}}^{\text{нач}} = 18,4^{\circ}\text{C}$, $Q_{\text{Фил}}^{\text{нач}} = 78$ л/ч, $Q_{\text{Конц}}^{\text{нач}} = 500$ л/ч, $Q_{\text{Рец}}^{\text{нач}} = 0$ л/ч, $\chi_{\text{Фил}}^{\text{нач}} = 5,4$ мкСм/см, $\chi_{\text{ВХ}}^{\text{нач}} = 457,5$ мкСм/см.

Опыты были выполнены в трех точках с различными значениями расхода рециркуляции: 200 л/ч, 300 л/ч, 400 л/ч. Эксперимент проводился до достижения в каждой из точек постоянных значений контролируемых показателей. Поток рециркуляции задавался частичным открытием/закрытием регулировочного вентиля.

На основании полученных результатов составлены зависимости изменения относительной электропроводности и расхода пермеата от

расхода рециркуляции, а также изменение температуры от величины рецикла и представлены на рисунках 5.14-5.16.

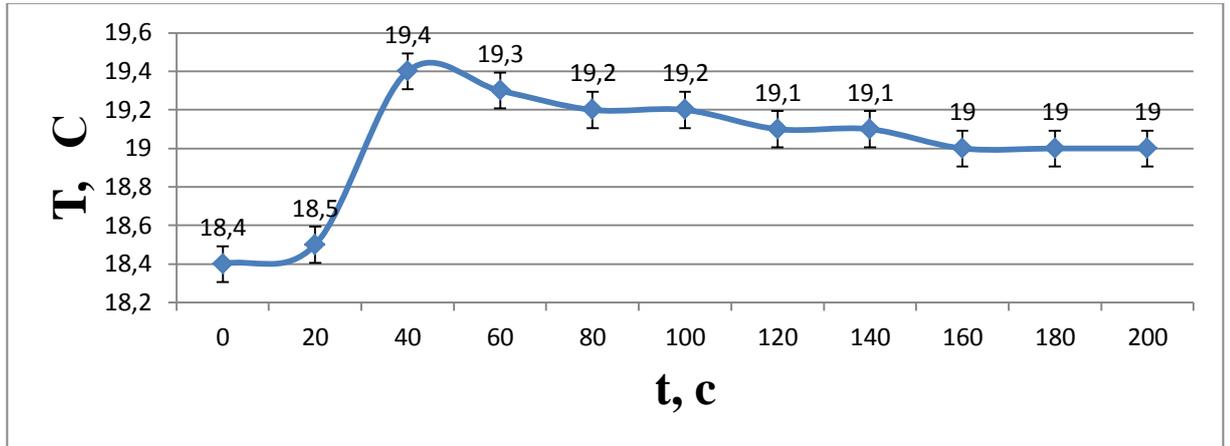


Рисунок 5.14. Зависимость изменения температуры при постоянном давлении от рецикла ($Q_{РЕЦ}=200$ л/ч)

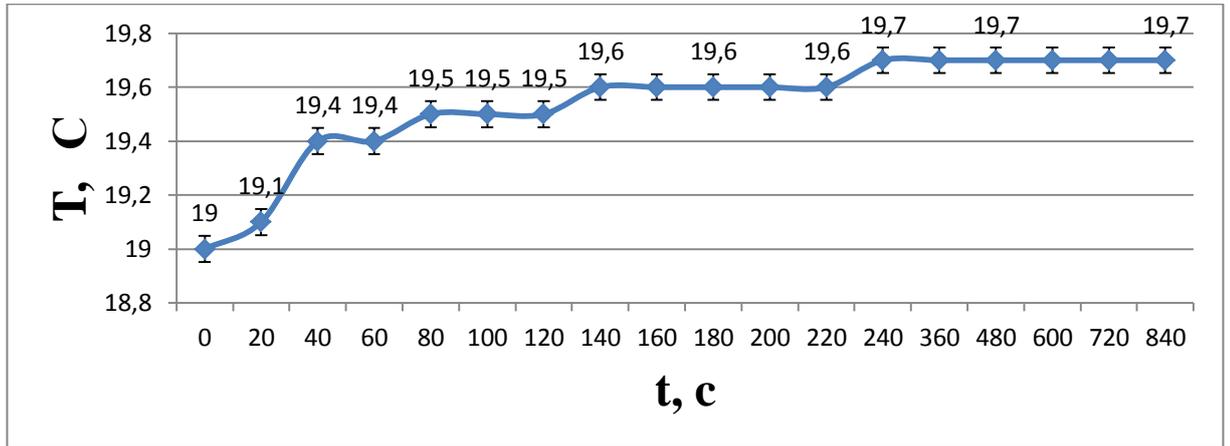


Рисунок 5.15. Зависимость изменения температуры при постоянном давлении от рецикла ($Q_{РЕЦ}=300$ л/ч)

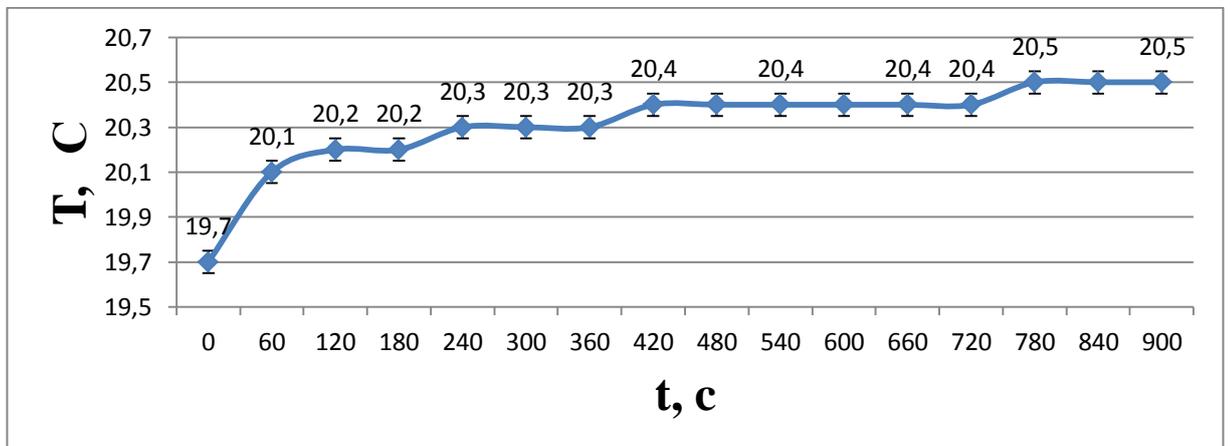


Рисунок 5.16. Зависимость изменения температуры при постоянном давлении от рецикла ($Q_{РЕЦ}=400$ л/ч)

Показано, что при $Q_{\text{реци}} = 200$ л/ч температура поднялась на $0,6^{\circ}\text{C}$. При увеличении рецикла на 100 л/ч (т.е. $Q_{\text{реци}} = 300$ л/ч) температура поднялась на $0,7^{\circ}\text{C}$, а при $Q_{\text{реци}} = 400$ л/ч рост значения температуры составил $0,8^{\circ}\text{C}$. Таким образом, суммарный прирост температуры составил $2,1^{\circ}\text{C}$. Из полученных данных следует, что система рециркуляции (даже при максимальном потоке) не оказывает существенного влияния на изменение температуры входной воды, а, следовательно, не внесут существенных изменений в показания качества фильтрата. Что в свою очередь, не окажет заметного воздействия на другие характеристики работы установки (в пределах погрешности измерения, не более 2-3%). Изменение производительности и селективности установки будут находиться в требуемых пределах и выдавать нормализованные значения.

Таким образом, приведенные данные показывают возможность применения системы рециркуляции как одного из возможных способов экономии исходной воды. А также одного из способов достижения необходимых концентраций модельных растворов при проведении исследований на тестовых мембранных установках.

5.4. Выводы по главе

1. Проведенные исследования на тестовых установках обратного осмоса показали, что при изменении температуры исходной воды в диапазоне $9-30^{\circ}\text{C}$, происходит изменение электропроводности пермеата на величину до 70% от начальных фиксированных значений, производительности – до 2-х раз.

2. Выполненные исследования позволили сформулировать ряд рекомендации по настройке параметров работы установок обратного осмоса в условиях переменной температуры исходной воды.

3. Исследование работы системы рециркуляции показало, что ее применение не приводит к значительным изменениям температуры исходной воды и не окажет существенного влияния на характеристики установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При проведении пилотных испытаний установок обратного осмоса введено понятие обобщенного мембранного элемента. Показано, что пилотные мембранные установки, описывающие работу обобщенного мембранного элемента, позволяют провести полномасштабное моделирование промышленного блока. Предложена классификация пилотных установок, проведен экспериментальный сравнительный анализ их эффективности.

2. На основании использования тестовых мембранных установок предложена технология и метод определения истинной локальной селективности и солепропускания обратноосмотических мембран. Предложена математическая модель расчета истинной селективности на основе экспериментальных результатов работы тестовой мембранной установки. Показано, что разработанная модель позволяет получать данные при различных рабочих условиях, по минеральным и органическим соединениям, а также в области высоких концентраций.

3. Представлены результаты экспериментальной апробации предложенной модели на концентрированных растворах сульфата магния. Показано, что при содержании его в исходной воде до 16,8 г/л истинное солепропускание обратноосмотической мембраны не превышает значение $sp_{и} = (1,59 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$.

4. Для обеспечения оптимальной работы установок предложена методика, позволяющая минимизировать влияние разброса персональных характеристик мембранных элементов на выходные параметры. Методика апробирована в условиях промышленной эксплуатации на установках различной производительности. Разработанная методика включает экспериментальное определение персональных характеристик в рабочих условиях или использование тестовых данных заводов-производителей мембранных элементов и численный расчет оптимального порядка

компоновки. Предложенная методика позволяет добиться симметричности потоков по корпусам, а также повысить общее качество фильтрата установки на величину до 25%.

5. Для оптимизации технологии химической очистки промышленных установок предложено использование набора пробных фильтрующих модулей. Определены основные требования к ним, разработаны требования и порядок выполнения отработки и подбора эффективных параметров химической мойки мембран. Показано, что данный метод и используемое технологическое оборудование позволяют существенно сократить время экспериментов и при этом подобрать эффективные моющие растворы с учетом особенностей отложений на поверхности мембран, определить оптимальные параметры циклов очистки. Совокупность приведенных мероприятий приводит к увеличению фильтроцикла до 6-7 месяцев, ресурса мембран до 2-х раз и сокращению эксплуатационных затрат.

6. Проведены исследования работы установок обратного осмоса при фиксированных рабочих настройках и переменной температуре исходной воды. Показано, что при колебаниях температуры в диапазоне 9-30°C, значения электропроводности изменяются на величину до 70% от начальных, а производительность – до 2-х раз. Разработаны рекомендации для подбора нерегулируемых рабочих параметров установки в условиях переменной температуры.

Список литературы

1. Фрог, Б.Н. Водоподготовка: учебн. пособие для вузов / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – Москва: МГУ, 1996. – 340 С.
2. Жадан, А.В. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС / А.В. Жадан, Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина // Новости теплоснабжения. – 2013. – №7. – С.35-40.
3. Стерман, Л.С. Химические и термические методы обработки воды на ТЭС / Л.С. Стерман, В.Н. Покровский // Энергия. – Москва: Энергия, 1981. – 232 С.
4. Мамет, А.П. Сравнение экономичности ионитного и обратноосмотического обессоливания воды / А.П. Мамет, Ю.А. Ситняковский // Электрические станции. – 2002. – №6. – С. 63-66.
5. Первов, А.Г. Обратный осмос и ионный обмен: какая технология победит в водоподготовке 21 века / А.Г. Первов, В.И. Бондаренко, И.С. Балаев // Экология производства. Энергетика. – 2006. – №1. – С. 1-5.
6. Бушуев Е.Н., Ларин А.Б., Жадан А.В. Опыт освоения новых технологий обработки воды на ТЭС. // Повышение эффективности энергетического оборудования. VI Всеоссийская науч.-практ. конф.: 6-8 дек. 2011. Материалы конф. / Под ред. А.В. Мошкарина. - Иваново: ГОУ ВПО ИГЭУ, 2011. - С. 298-303.
7. Кишнеvский, В.А. Современные методы обработки воды в энергетике / В.А. Кишнеvский. – Одесса: ОПГУ, 1999. – 196 С.
8. Бушуев Е.Н., Еремина Н.А., Жадан А.В. Состояние и анализ новых технологий водоподготовки на ТЭС. // Повышение эффективности энергетического оборудования. VII Всеоссийская науч.-практ. конф.: 13-15 ноября 2012 . Материалы конф.- Санкт-Петербург, 2012. - С. 233-245.
9. Гребенюк, В.Д. Обессоливание воды ионитами / В.Д. Гребенюк, А.А. Мазо. – Москва: Химия, 1980. – 256 С.

10. Harfst William F., Mechanics of Ion-Exchange System Operation // *Ultrapure Water*. - 2013. – № 4 – P. 20-21.
11. Опыт эксплуатации фильтров с противоточной технологией регенерации ионитов для водоподготовки химических цехов ТЭЦ-1 и ТЭЦ-2 г. Волжского / Р.Г. Проскуракова, В.В. Еременко, И.В. Ракова [и др.]. // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2008. – №4. – С. 43-44.
12. McDonald J., Is Zero Liquid Discharge Really Possible? // *Ultrapure Water*. - 2014. – № 3. – P. 33-34.
13. Бушуев, Е.Н. Выбор экологически эффективной технологии водоподготовки на Заинской ГРЭС / Е.Н. Бушуев, А.С. Новоселова // *Вестник ИГЭУ*. – 2008. – №4. – С. 8-12.
14. Технологические аспекты выбора оптимальных схем обессоливания питательной воды парогенераторов ТЭС и промышленных предприятий / И.А. Малахов, А.А. Аскерния, И.И. Боровкова [и др.]. // *Теплоэнергетика*. – 2004. – №7. – С. 19-24.
15. Wong Joseph M. Reuse, Treating an Industrial Wastewater to High-Purity Water Quality Using Membrane and IX Technologies // *Ultrapure Water*. - 2014. – № 5. – P. 22-26.
16. Унификация технических решений при создании малоотходных установок термохимического обессоливания сточных вод ТЭС / А.С.Седлов, В.В.Кудрявый, А.Я. Копсов [и др.]. // *Вестник МЭИ*. – 1999. – №4. – С. 22-26.
17. Выбор оптимального метода водоподготовки для тепловых электростанций / А.С. Седлов, В.В. Шищенко, Б.С. Федосеев [и др.]. // *Теплоэнергетика*. – 2005. – №4. – С. 54-60.
18. Современные подходы при строительстве ВПУ с использованием технологий термического обессоливания / И.Ш. Загретдинов, 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.

19. Приказ Минэнерго РФ от 19.06.2003 №229 "Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации" // Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – 2003 г.
20. Свитцов, А.А. Введение в мембранную технологию / А.А. Свитцов. – Москва: ДеЛи Принт, 2007. – 208 С.
21. Дытнерский, Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю.И. Дытнерский. – Москва: Химия, 1986. – 272 С.
22. Лейси, Р. Технологические процессы с применением мембран / Лейси Р., Лоэб С. – Москва: Мир, 1976. – 372 С.
23. Ресурсосберегающие и энергоэффективные мембранные технологии в промышленной водоподготовке/ А.А. Пантелеев Б.Е. Рябчиков, А.В. Жадан [и др.] // Мембраны 2010: материалы Всерос. науч.-тех. конф. - Москва, 2010. Т. 2. – С. 127.
24. Ларин, Б.М. Технологическое и экологическое совершенствование водоподготовительных установок на ТЭС / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Н.В. Бушуева // Теплоэнергетика. – 2001. – №8. – С. 23-27.
25. Громогласов, А.А. Вооподготовка: процессы и аппараты: учеб. пособие для вузов / А.А. Громогласов, А.С. Копылов, А.П. Пильщиков. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 272 С.
26. 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.
27. 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.
28. Опыт внедрения установки обратного осмоса УОО-166 на Нижнекамской ТЭЦ-1 / Б.Н. Ходырев, Б.С. Федосеев, А.И. Калашников [и др.]. // Электрические станции. – 2002. – №6. – С. 54-62.

29. Henley Mike, The Waterside: Membranes – A Workhorse in Today's Industrial Plant // *Industrial Water Treatment*. – 2014. – № 5. – P. 4-10.
30. Баромембранные процессы и аппараты / Г.И. Николаев, Ю.М. Ханхунов, Г.Ж. Ухеев [и др.]. – Улан-Удэ : ВСГТУ, 2007. – 66 С.: ил.
31. Дзюбенко, В.Г. Мембранные технологии в программе "Чистая вода" / В.Г. Дзюбенко, А.С. Кондрашев // *Водоснабжение и канализация*. – 2010. – №1-2. – С. 41-46.
32. Кожуховский, И.С. Анализ ситуации и прогноз развития электроэнергетики / И.С. Кожуховский // *Электрические станции*. – 2009 – №6. – С. 2-6.
33. Ольховский, Г.Г. Тепловая энергетика в начале XXI века / Г.Г. Ольховский // *Электрические станции*. – 2011. – №6. – С. 3-12.
34. Тепловые электрические станции / В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров [и др.]. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. – 466 С.
35. Ольховский, Г.Г. Теплоэнергетические технологии в период до 2030 г. / Г.Г. Ольховский, А.Г. Тумановский // *Известия российской академии наук. Энергетика*. – 2008. – №6. – С. 79-94.
36. Серант, Д.Ф. Практика совместной работы зарубежных и отечественных компаний на российском рынке энергетического строительства / Д.Ф. Серант // *Новое в российской электроэнергетике*. – 2012. – №6. – С. 13-22.
37. Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций. / ВНТП 81. – М.: Министерство энергетики и электрофикации СССР, 1981.
38. Копылов, А.С. Водоподготовка в энергетике / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – Москва: МЭИ, 2006. – 320 С.
39. Грисбах, Р. Теория и практика ионного обмена / Р. Грисбах. – Москва: ИЛ, 1963. – 336 С.
40. Жадан, А.В. Особенности практической реализации эффективных ионообменных систем / А.В. Жадан // *Энергетик*. – 2013. – №2. – С. 35-38.

41. Громов, С.Л. Технологии противоточной регенерации ионитов для водоподготовки. Часть 1 / С.Л. Громов, А.А. Пантелеев // Теплоэнергетика. – 2006. – №8. – С. 33-37.
42. Громов, С.Л. Технологии противоточной регенерации ионитов для водоподготовки. Часть 2 / С.Л. Громов, А.А. Пантелеев // Теплоэнергетика. – 2006. – №11. – С. 50-55.
43. Белоусов, М.М. Типовая инструкция по обслуживанию водоподготовительных установок, работающих по схеме химического обессоливания / Н.П. Белоусов, М.М. Браудо, Г.А. Зачинский. – Москва : СЦНТИ ОРГРЭС, 1975 г.
44. Downey Donald, Ion Exchange – Troubleshooting an Ion Exchange Mixed-Bed Unit // Ultrapure Water. – 2014. – № 4. – P. 17-21.
45. Внедрение противоточной технологии химобессоливания UPCORE на ВПУ Новгородской ТЭЦ / И.А. Малахов, В.И. Сосинович, А.Ф. Голуб [и др.]. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – №4. – С. 3-5.
46. Жадан, А.В. Практическая реализация противоточной технологии ионного обмена / А.В. Жадан, Е.Н. Бушуев // Вестник ИГЭУ. – 2012. – №5. – С. 10-15.
47. Рынок ионообменных смол в России 2015. Показатели и прогнозы / TEBIZ GROUP // www.tebiz.ru, 2015 г. – 89 С.
48. Термическая водоподготовка и переработка сточных вод для производств с высокими экологическими показателями / А.С. Седлов, В.В. Шищенко, И.П. Ильина [и др.]. // Промышленная энергетика. – 1993. – №7. – С. 18-22.
49. Шищенко, В.В. Водоподготовительные установки с утилизацией сточных вод / В.В. Шищенко, А.С. Седлов // Промышленная энергетика. – 1992. – №10. – С. 29-30.
50. Седлов, А.С. Малоотходная технология переработки сточных вод на базе термического обессоливания / А.С. Седлов, В.В. Шищенко // Энергетик. – 1996. – №11. – С. 17-20.

51. Лоренц, К.Б. Термохимическая очистка сточных вод водоподготовительных установок / К.Б. Лоренц, В.В.Шищенко // Труды МЭИ. – 1994. – №671. – С. 113-117.
52. Кострикин, Ю.М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления / Ю.М. Кострикин, Н.А. Мещерский, О.В. Коровина. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 248 С.
53. Васина, Л.Г. Предотвращение накипеобразования с помощью антинакипинов / Л.Г. Васина, О.В. Гусева // Теплоэнергетика. – 1999. – №7. – С. 35-38.
54. Лифшиц, О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок. Изд. 2-е, перераб. и доп. / О.В. Лифшиц. – Москва : Энергия, 1976. – 288 С.: ил.
55. Седлов, А.С. Комплексная термическая водоподготовительная установка ТЭЦ-7 Ленэнерго / А.С. Седлов, В.А. Васин, Ф.Н. Пухов // Энергетик. – 1998. – №8. – С. 23-25.
56. Седлов, А.С. О качестве подготовки воды в многоступенчатых испарительных установках / А.С. Седлов, В.В. Шищенко, Е.М. Игрушкин // Энергетик. – 1996. – №8. – С. 18-21.
57. Васина, Л.Г. Организация водно-химического режима испарительных установок / Л.Г. Васина, А.В. Богловский, А.В. Горбунов // Новое в российской электроэнергетике. – 2014. – №2. – С. 26-37.
58. Организация водно-химического режима термической водоподготовки / А.В. Богловский, В.Б. Чернозубов, Н.Е. Черных [и др.]. // Теплоэнергетика. – 2007. – №7. – С. 15-19.
59. Верхошенцева, Н.Н. Опыт эксплуатации установок обратного осмоса в системах водоподготовки энергетических и металлургических объектов ОАО «ММК» / Н.Н. Верхошенцева, Г.И. Давлетшина // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – №5 (43). – С. 25-27.

60. Мембранные технологии сегодня. Перспективы проекта "Русские мембраны". / В.Г. Дзюбенко В.П. Дубяга, А.А. Свитцов, Г.Г. Каграманов // Мембраны. – Москва: ИФС РАН им. А.В. Топичева, 2010. – Т. 2.
61. Юрчевский, Е.Б. Зарубежные обратноосмотические установки / Е.Б. Юрчевский, А.П. Мамет // Теплоэнергетика. – 1984. – №7. – С. 73-74.
62. Карелин, Ф.Н. Обессоливание воды обратным осмосом / Ф.Н. Карелин. – Москва : Стройиздат, 1988. – 208 С.
63. Мулдер М. Введение в мембранную технологию / под ред. С.И. Япольского, В.П. Дубяги. – Москва : Мир, 1999. – 513 С.
64. Юрчевский, Е.Б. Применению обратноосмотической технологии обессоливания в энергетике – 20 лет / Е.Б.Юрчевский, А.Г.Первов, М.А.Пичугина // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – №5. – С. 2-8.
65. Галас, И.В. Обессоливание добавочной воды котлов на ТЭЦ-23 обратным осмосом / И.В. Галас, Е.Ф. Чернов, Ю.А. Ситняковский // Электрические станции. – 2002. – №2. – С. 16-21.
66. Лесков, Е.Е. Оптимизация систем мембранного разделения / Е.Е. Лесков, А.М. Цирлин // Теоретические Основы Химической Технологии. – 2007. – №5.– С. 491-498.
67. Мембранные методы очистки поверхностных сточных вод / А.П. Андрианов, Д.В. Спицов, А.Г. Первов, Е.Б. Юрчевский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009 г. – №6. – С. 29-37.
68. Victor Dvornikovm, Strategies to Improve Desalination Plant Reliability // Industrial Water Treatment. – 2013. – № 6. – P. 14-17.
69. Ситняковский, Ю.А. Обратный осмос для обессоливания добавочной воды в схеме питания паровых котлов / Ю.А. Ситняковский, А.С. Григорьев, В.В. Ноев // Энергосбережение и водоподготовка. – 1998. – №6. – С. 54-62.
70. Первов, А.Г. Разработка мембранных аппаратов с "открытым каналом" с целью ликвидации осадкообразования и сокращения расходов на

предочистку при использовании мембранных технологий в водоподготовке / А.Г. Первов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – №6. – С. 5-9.

71. Перспективное оборудование для водоподготовительных установок электростанций с ядерными энергетическими реакторами / Е.Б. Юрчевский, А.Г. Первов, А.П. Андрианов [и др.]. // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. – №25. – С. 113-125.

72. Боронина, Л.В. Обоснование необходимости внедрения мембранных технологий для водоподготовки на теплоэнергетических предприятиях г. Астрахани / Л.В. Боронина, А.Э. Усынина, А.П. Андрианов // Вестник МГСУ. – 2012. – №11. – С. 198-203.

73. Использование современных интегрированных мембранных технологий для улучшения качества питательной воды на предприятиях энергетики. Часть 1 / С.Л. Громов, М.П. Ковалев, А.Р. Сидоров [и др.]. // Водоочистка. – 2007. – №8. – С. 13-16.

74. Использование современных интегрированных мембранных технологий для улучшения качества питательной воды на предприятиях энергетики. Часть 2 / С.Л. Громов, М.П. Ковалев, А.Р. Сидоров [и др.]. // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. – 2008. – №2. – С. 20-29.

75. Первов, А.Г. Повышение экологичности мембранных установок: разработка технологии водоподготовки с уменьшенным сбросом концентрата / А.Г. Первов, А.П. Андрианов, Т.П. Горбунова // Научный потенциал регионов на службу модернизации. – 2013. – №3 (6). – С. 48-53.

76. Первов А.Г., Андрианов А.П., Юрчевский Е.Б. Современные технологии водоподготовки защиты оборудования от коррозии и накипеобразования // Совершенствование мембранных систем водоподготовки - исключение реагентов и стоков. – Москва, 2011. – С. 34-44.

77. Федоренко, В.И. Производство ультрачистой воды с применением двухступенчатого обратного осмоса / В.И. Федоренко, И.Е. Кирякин, С.С. Бурковский // Мембраны. – 2004. – №4 (24). – С. 5-17.

78. Stephen P. Chesters, Matthew W. Armstrong RO – Innovations in Membrane Cleaning // *Industrial Water Treatment*. – 2015. – № 4. – P. 25-30.
79. Knoell Tom, Membranes: RO Element Replacement Strategy for a Large-Scale // *Industrial Water Treatment*. – 2014. – № 5. – P. 23-29.
80. Громов, С.Л. Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования / С.Л. Громов, А.А. Пантелеев // Опыт НПК "Медиана-Фильтр" по применению ИМТ и их комбинаций с ионным обменом для водоподготовки. – Москва, 2011. – С. 44-55.
81. Использование метода обратного осмоса для водоподготовки в теплоэнергетике / А.Н. Самодуров, С.Е. Лысенко, С.Л. Громов [и др.]. // *Теплоэнергетика*. – 2006. – №6. – С. 26-30.
82. Малосточная и экологически чистая технология получения воды для подпитки теплосетей / С.Л. Громов, А.А. Пантелеев, Е.Б. Федосеева [и др.]. // *Энергетик*. – 2005. – №3. – С. 30-32.
83. Юрчевский, Е.Б. Современное отечественное водоподготовительное оборудование для обессоливания и умягчения воды на ТЭС / Е.Б. Юрчевский // *Теплоэнергетика*. – 2002. – №3. – С. 62-67.
84. СТО 70238424.27.100.013-2009. Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Нормы и требования. – Москва, 2009 г.
85. Steel Industry: Part 1 – Optimization of Pretreatment and Reverse Osmosis Desalination of Steel Plant Inorganic Wastewater Effluent / Anna Jawor, Eric M.V. Hoek, Arian Edalat, Young-O Kim // *Industrial Water Treatment*. – 2014. – № 6. – P. 11-16.
86. Громов С.Л., Пантелеев А.А., Сидоров А.Р. Опыт применения интегрированных мембранных технологий // *International Water Association Мембранные технологии в водоподготовке и очистке сточных вод ЭКВАТЭК-2008*. – Москва : SIBICO International Ltd., 2008.

87. Водоподготовка и водно-химические режимы ЭС. Цели и задачи / М.П. Ковалев, А.В. Жадан, А.А. Пантелеев [и др.]. // Выбор технологических схем при строительстве новых и реконструкции старых водоподготовительных установок. – Москва: ОАО "ВТИ", 2013.

88. Подходы к проектированию и оптимизации водоподготовительных установок, основанных на интегрированных мембранных технологиях/ А.А. Пантелеев, В.Ф. Очков, К.А. Орлов [и др.]. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – №6. – С. 14-18.

89. Мембранные методы очистки поверхностных вод / А.П. Андрианов, Д.В. Спицов, А.Г. Первов [и др.]. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – №7. – С. 29-35.

90. Опыт использования мембранных технологий для очистки и опреснения воды / А.В. Десятов, А.Е. Баранов, Е.А. Баранов [и др.]. – Москва : Химия, 2008. – 240 С.

91. Карелин, Н.Ф. Принцип использования обратноосмотического обессоливания воды на электростанциях / Н.Ф.Карелин, В.А.Таратута, Е.Б. Юрчевский // Теплоэнергетика. – 1993. – №7. – С. 8-10.

92. Рябчиков, Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б.Е. Рябчиков. – Москва: ДеЛи Принт, 2004. – 328 С.

93. Пантелеев, А.А. Схемно-технологические решения водоподготовительных установок на базе интегрированных мембранных технологий для парогазовых ТЭС / А.А. Пантелеев, В.Ф. Очков, С.С. Гавриленко // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014. – №4 (90). – С. 11-17.

94. Пантелеев, А.А. Выбор схем водоподготовительных установок на основе мембранных технологий с точки зрения надежности и экономичности / А.А. Пантелеев [и др.]. // Водоснабжение и канализация. – 2014. – №1-2. – С. 8-13.

95. Шаповалов, Д.А. Пилотные испытания установок обратного осмоса. Основные методологические подходы /Д.А. Шаповалов // Тезисы докладов VIII Международного водно-химического форума. – Москва. – 6-10 апреля 2015. – С. 56-57.

96. Пантелеев, А.А. О контроле потоков воды в установках водоподготовки / А.А. Пантелеев, С.Ю. Ларионов, М.М. Шилов // Водоснабжение и канализация. – 2015. – №1-2. – С. 48-55.

97. Выбор технологии химической очистки обратноосмотических установок на промышленных предприятиях /А.А. Пантелеев, В.В. Бобинкин, С.Ю. Ларионов, Б.Е. Рябчиков, В.Б. Смирнов, Д.А. Шаповалов // Новое в российской электроэнергетике. – 2016. – №4. – С. 22-31.

98. Шаповалов, Д.А. Исследование вопросов оптимизации компоновки мембранных элементов в промышленных установках обратного осмоса / Д.А. Шаповалов, А.А. Пантелеев // Тезисы докладов XXII Международной научно-практической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т4. Москва. Издательский дом МЭИ. – 2015. – 25-26 февраля 2016. – С. 144.

99. Мембранные технологии в промышленной водоподготовке / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчиков, О.В. Хоружий [и др.]. – Москва: ДеЛи плюс, 2012. – 429 С.

100. Громов, С.Л. Современные технологии водоподготовки в промышленности и энергетике / С.Л. Громов, А.А. Пантелеев, А.Р. Сидоров // АКВА magazine. – 2007. – №1. – С. 44-45.

101. Пантелеев А.А., Рябчиков Б.Е., Федосеева Е.Б. Ресурсосберегающие и энергоэффективные мембранные технологии в промышленной водоподготовке // Мембраны. – Москва: ИФС РАН им. А.В. Топчиева, 2010. – Т. 2.

102. Первов, А.Г. Современные высокоэффективные технологии очистки питьевой и технической воды с применением мембран: обратный

осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация / А.Г. Первов. – Москва: АСВ, 2009. – 231 С.

103. Flemming, H.-C. Reverse Osmosis Membrane Biofouling // Experimental Thermal and Fluid Science. – 1997. – P. 14.

104. Erica Robles, Ray Eaton, Lee Durham Membranes – How RO System Optimization Helped a California Beverage Plant Reduce Water Consumption by 20% // Industrial Water Treatment. – 2015. – № 5. – P. 13-17.

105. Standfield Bill Dees, David Paul, Mark Wilf Recovery of RO Membrane Performance through Direct Osmosis-High Salinity Membrane Cleaning Process // Ultrapure Water. – 2012. – №5. – P. 21-25.

106. Шоботов, С.С. Математическое моделирование процесса обратноосмотической деминерализации воды / С.С. Шоботов, А.А. Квитка, Фредж Федри // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – С. 55-58.

107. Юрчевский, Е.Б. Использование мембранных технологий в водоподготовке на энергетических объектах / Е.Б. Юрчевский, А.Г. Первов // Аква-Терм. – 2007. – №1. – С. 64-67.

108. Копылов, А.С. Процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их программированные расчеты / А.С. Копылов, В.Ф. Очков, Ю.В. Чудова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. – 224 С.

109. Первов, А.Г. Новые горизонты применения мембран обратного осмоса и нанофильтрации / А.Г. Первов, А.П. Андрианов, Д.В. Спицов // Сантехника. – 2007. – №6. – С. 20-26.

110. Тихонов, И.А. Технология обратноосмотического обессоливания воды для паровых котлов низкого и среднего давления / И.А. Тихонов, М.А. Агеев // Вестник СГТУ. – 2011. – №3с (54). – С. 206-212.

111. Влияние температуры на процесс обратноосмотического опреснения воды Каспийского моря / А.В. Десятов, А.В. Асеев, О.А. Подымова [и др.]. // Критические технологии. Мембраны. – 2007. – №3 (35). – С. 28-36.

112. Беликов, С.Е. Водоподготовка: Справочник / С.Е. Беликов. – Москва: Аква-Терм, 2007. – 240 С.

113. Бушуев, Е.Н. Расчет температурной зависимости ионного произведения, удельной электропроводности воды и предельно разбавленных растворов электролитов / Е.Н. Бушуев // Вестник ИГУЭ. – 2007. – №2. – С. 1-4.

114. Чалых, А.Е. Диффузия в полимерных системах / А.Е. Чалых. – Москва: Химия, 1987. – 312 С.

115. Дмитриев, Е.А. Исследование влияния концентрационной поляризации и его учет в процессах разделения растворов обратным осмосом: дисс. .канд. техн. наук. – Москва : МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1980. – 179 С.

116. Дегремент, С.А. Технический справочник по обработке воды / С.А. Дегремент. – Санкт-Петербург: Новый журнал, 2007. – Т.2. – 920 С.

117. Технология глубокого обессоливания добавочной воды на ТЭС с утилизацией сточных вод / И.А. Малахов, А.А. Аскерния, И.И. Боровкова [и др.]. // Теплоэнергетика. – 2006. – №8. – С. 14-16.

118. Стерман, Л.С. Химические и термические методы обработки воды на ТЭС / Л.С. Стерман, В.Н. Покровский. – Москва: Энергия, 1981. – 231 С.

119. Электрохимическая регенерация ионообменных колонок в условиях поперечной циркуляции равновесного раствора / В.Д. Гребенюк, Н.П. Гнусин, И.Б. Бармашенко [и др.] // Электрохимия. – 1970. – Т. 6. – №1. – С. 139-142.

120. Оптимизация порядка компоновки мембранных элементов в промышленных установках обратного осмоса / В.В. Бобинкин, С.Ю. Ларионов, А.А. Пантелеев, Д.А. Шаповалов, М.М. Шилов // Теплоэнергетика. – 2015. – №10. – С. 49-55.

121. Шаповалов Д.А., Пантелеев А.А., Одноралова Д.В. Исследование рабочих параметров обратноосмотической установки / Д.А. Шаповалов, А.А.

Пантелеев, Д.В. Одноралова // Тезисы докладов XIX Международной научно-практической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т4. Москва. Издательский дом МЭИ. – 2013. – 28 февраля-1 марта 2013. – 119 С.

122. Шаповалов, Д.А. Исследование особенностей работы обратноосмотической установки в переменном температурном режиме / Шаповалов Д.А., Пантелеев А.А. // Тезисы докладов XX Международной научно-практической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т4. Москва. Издательский дом МЭИ. – 2014. – 27-28 февраля 2014. – 110 С.

123. Шаповалов, Д.А. Влияние переменного температурного режима на параметры работы обратноосмотической установки / Шаповалов Д.А., Пантелеев А.А. // Тезисы докладов XXI Международной научно-практической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т4. Москва. Издательский дом МЭИ. – 2015. – 26-27 февраля 2015. – 47 С.

124. Легезо, О.А. Влияние измерительных датчиков кондуктометра на результаты измерения электропроводности глубокообессоленной воды / Легезо О.А., Шаповалов Д.А., Пантелеев А.А. // Тезисы докладов XXII Международной научно-практической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Т4. Москва. Издательский дом МЭИ. – 2015. – 25-26 февраля 2016. – 130 С.

125. Dow Water & Process Solution. FILMTEC Reverse Osmosis Membranes. Technical Manual. // Режим доступа: http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_095b/0901b8038095b91d.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-00071.pdf&fromPage=GetDoc.

126. Требования к проектированию систем водоочистки / Пантелеев А.А., Шаповалов Д.А., Календарёв Р.Н., Ларионов С.Ю. // Новое в российской электроэнергетике. – 2015. – №10. – С. 16-26.

127. Рябчиков, Б.Е. Современная водоподготовка / Б.Е. Рябчиков. – Москва: ДеЛи плюс, 2013. – 680 С.

128. Расчетная программа для проектирования установок обратного осмоса: ROSA. Режим доступа: <http://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/resources/design-software/rosa-software>.

Приложение №1. Акт внедрения

МЕДИАНА-ФИЛЬТР

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ, АО

Тел.: +7 (495) 66-00-77-1, факс: +7 (495) 66-00-77-2, www.mediana-filter.ru, e-mail: info@mediana-filter.ru
 Адрес юридический: 119270, Москва, Набережная Лужнецкая, д. 2/4, стр. 17
 Для корреспонденции: 105318, Москва, ул. Тацкая, д. 1
 ИНН: 7707171229, КПП: 770401001

Акт о внедрении

результатов диссертационного исследования Шаповалова Д.А. на тему:

«Исследование и оптимизация режимов работы обратноосмотических установок в задачах построения ВПУ для ТЭС»

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Шаповалова Дмитрия Александровича на тему «Исследование и оптимизация режимов работы обратноосмотических установок в задачах построения ВПУ для ТЭС» обладают актуальностью, представляют широкий практический интерес и внедрены в регламенты работы технического департамента нашего предприятия. Их значимость подтверждается успешным практическим использованием разработанных автором методик и полученных результатов при проектировании и режимной наладке установок обратного осмоса в составе систем водоподготовки.

Зам. технического директора
АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР»



В.Б. Смирнов

25.05.2016 г.