

На правах рукописи



**Лю Яньцин**

**РАЗРАБОТКА МЕМБРАННЫХ УСТАНОВОК  
НА ОСНОВЕ БАРОМЕМБРАННЫХ  
МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ВОДЫ**

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва - 2013**

Работа выполнена на кафедре кибернетики химико-технологических процессов  
Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева

Научный руководитель                      Доктор технических наук, доцент  
**Захаров Станислав Леонидович**  
профессор кафедры стандартизации  
и инженерно-компьютерной графики  
Российского химико-технологического  
университета имени Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты                      Доктор технических наук, профессор  
**Комиссаров Юрий Алексеевич**  
заведующий кафедрой электротехники  
и электроники Российского химико-  
технологического университета имени  
Д.И. Менделеева

Кандидат технических наук, доцент  
**Поторжинский Игорь Всеволодович**  
доцент кафедры химической технологии  
и промышленной экологии Московского  
государственного университета дизайна  
и технологии

Ведущая организация                      Московский государственный университет  
леса

Защита состоится « 02 » июля 2013г. в 13: 30 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.204.03 при РХТУ имени Д. И. Менделеева  
(125047, г. Москва, Миусская пл., д.9) в Конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном  
центре РХТУ имени Д. И. Менделеева.

Автореферат диссертации разослан « 27 » мая 2013г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
Д 212.204.03



Женса А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

В настоящее время баромембранные процессы используются во многих отраслях промышленности и потребности в данной технологии продолжают расти. Особенно они актуальны для обеспечения безопасной жизнедеятельности человека. Важнейшей проблемой обеспечения безопасности жизнедеятельности человека является обеспечение его чистой водой. Для получения чистой воды наиболее эффективны мембранные методы обратного осмоса в сочетании с такими технологическими процессами, как дистилляция, экстракция и др. В этой связи разработка аппаратов для баромембранных процессов является важным направлением развития технологии разделения жидких систем.

Однако, широкое внедрение баромембранных процессов разделения в настоящее время сдерживается следующими факторами: дефицит в эффективных микропористых полупроницаемых мембранах; нестабильность свойств микропористых полупроницаемых мембран; избыточная металлоемкость мембранных установок; неэффективность системы крепежа мембран и их укладки в установках; недостаточная герметичность разъемных соединений в условиях повышенных рабочих давлений; ненадежность уплотнений при многократных сборно-разборных операциях; ненадежность креплений мембран с повышенной хрупкостью; утечка агрессивных сред в высоконапорных процессах; явления кавитации и гидравлических ударов при работе насосов давления в высоконапорных схемах обратного осмоса и др.

В связи с вышеизложенным актуальным является исследование и разработка мембранных аппаратов на основе модульного принципа с применением жестких мембран, характеристики которых были бы надежными и предсказуемыми в течение всего срока эксплуатации, при наличии взаимозаменяемых элементов с надежными герметичными разъемными соединениями.

Цель работы заключается в разработке конструкций аппаратов с учетом стабильно-прочностных характеристик полупроницаемых поверхностей цилиндрических и плоской форм.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

- разработать экспериментальные установки для испытания свойств мембран различных типов;
- выполнить исследования основных свойств мембран различных

типов в широком диапазоне варьируемых параметров внутренних (структурных) и внешних факторов (давления, температуры, концентрации и других факторов);

- на основе результатов сравнения потребительских свойств мембран различных типов рекомендовать наиболее пригодные типы мембран для длительной эксплуатации в производственных условиях;

- на основе комплексных испытаний на пилотных установках выявить пути совершенствования конструктивных и эксплуатационных свойств производственных установок обратного осмоса;

- конструирование аппаратов баромембранного разделения с нетрадиционными разъемными соединениями основных рабочих элементов;

- конструирование аппаратов баромембранных процессов с реальным использованием выявленного температурного эффекта;

- конструирование аппаратов баромембранных процессов с герметичными разъемными соединениями хрупких трубчатых полупроницаемых элементов;

- проверить надежность предложенных методов совершенствования конструкций баромембранных установок в производственных условиях на станциях очистки воды.

### **Научная новизна.**

Выявлено влияние внешних факторов на уровень стабильности полупроницаемых поверхностей аппаратов баромембранных процессов при различных параметрах исходного раствора и факторов окружающей среды.

Разработаны новые локальные системы очистки жидкостей, растворов и сточных вод с использованием как традиционных низконапорных, так и высоконапорных обратноосмотических процессов разделения, которые не только обеспечивают охрану окружающей среды и возврат в производство очищенной воды, технологических растворов, масел и других, но и обеспечивают безопасность жизнедеятельности человека в экстремально радиационно-бактериологической обстановке.

Получил дальнейшее развитие ранее выявленный факт положительного влияния температуры на процессы разделения на примере улучшения характеристик разделения капиллярно-пористых мембран (КПМ) при повышении температуры исходного раствора. Как показали исследования, производительность процессов разделения с повышением температуры исходных растворов существенно повышаются.

Выявлено отсутствие концентрационной поляризации на примере очистки модельно-шахтных вод боросиликатными (Br-Si) мембранами. Имеет место влияние гидратирующей способности ионов на проницаемость и селективность мембран различной стабильности и

жесткости пористой структуры. Процесс обратного осмоса прекращается при отсутствии в растворе подвижной воды при концентрации воды, близкой к границе полной гидратации.

Применены неорганические пористые мембраны нового класса, пористая структура которых лишена такого недостатка как деформация пор под воздействия приложенных давления, температурного воздействия и рН среды при сохранении всех прочностных, стабилизационных и других характеристик.

Впервые разработаны серии новых корпусных и безкорпусных аппаратов с жесткими мембранами нетрадиционных геометрических размеров и их разъемных соединений и т.д.

### **Практическая ценность.**

Практические результаты по стабильности работы мембран получили признание и используются в практике при определении работоспособности и стабильности мембран в конкретных рабочих средах.

Выявленный эффект улучшения характеристик разделения капиллярно-пористых мембран с повышением температуры широко используется при работе с исходными растворами и сточными водами повышенной температуры, помогая производителям и разработчикам интенсифицировать процесс без затрат на охлаждение реальных стоков. В результате проведенного исследования высоконапорную обратно-осмотическую аппаратуру рекомендовано укомплектовывать водяными, паровыми или электронагревательными рубашками для подогрева исходного раствора.

Практически востребованными оказались результаты комплексного исследования пористости мембран адсорбционными и электронно-микроскопическими способами, а также методом ртутной порометрии. Особую практическую значимость имеют результаты разделения ионов с близкими энергиями гидратации. Результаты могут быть использованы в установках пофракционного разделения растворов и при получении сверхчистой воды для электронной промышленности.

Практически востребованными оказались аппараты обратного осмоса в корпусном исполнении, которые были усовершенствованы с помощью сальниковой коробки обычного исполнения и сальникового уплотнения с плавающей сальниковой коробкой. Разработаны аппараты безкорпусного типа в варианте торцового исполнения при подборе соответствующих каждой конструкции аппарата жестко-эластичных, температурно-устойчивых и коррозионностойких уплотнительных материалов определенной толщины и оптимальных усилий сжатия мембран.

Особым практическим спросом пользуются сравнительно дешевый аппарат, для которого впервые были разработаны легко разбирающиеся

разъемные соединения мембран и корпусных элементов из специальных деталей из различных материалов. Практически важным достоинством разработанных аппаратов возможность быстрой замены выработавших ресурс мембран.

Практическое значение имеют сконструированные ячейки обратного осмоса с радиально направленными магнитными потоками для надежного вращения магнитных мешалок, снимающих вредное влияние концентрационной поляризации.

Высоконапорный обратный осмос обеспечивает высокую селективность очистки процесса и вместе с тем в отличие от низконапорного требует более высококвалифицированного обслуживающего персонала владеющего практическими навыками в обеспечении исследований при высоких давлениях, более надежной и дорогостоящей аппаратуры, насосов давления, прокладок, разъемных соединений, систем отбора проб, обеспечения необходимых гидродинамических условий и т. д.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на V Международной конференции ВНИИМЕТМАШ «Металлургия XXI века», Москва, 16 февраля 2009г.; Международной научно-практической конференции «Наука сегодня, теоретические аспекты и практика применения», Тамбов, октябрь, 2011г.; Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновации и актуальные проблемы техники и технологий», Саратов, ноябрь, 2009г.; опубликованы в Известиях ВУЗов. Химия и химическая технология, 2010, Т.53, №5, С.66-68; Объединенном научном журнале, 2006, №28, С.55-56; журнале «Ремонт, восстановление, модернизация», 2008, №12, С.44-47.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного содержания, выводов и списка цитируемой литературы, 134 ссылки, и включает 64 рисунка и 8 таблиц. Общий объем диссертации составляет 127 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются основные положения и цель, а также задачи исследования. Определяется научная новизна, практическая значимость, приводятся основные результаты работы.

**В первой главе** изложено современное состояние применения обратного осмоса для очистки воды. Дана характеристика методов очистки сточных вод и мембран, используемых для очистки. Дан аналитический обзор работ по влиянию внутренних (структурных) и внешних (гидродинамической обстановки, давления, температуры, концентрации растворов, природы солей) факторов на разделение растворов. Особое внимание уделено причинам нестабильности мембран и факторам, обеспечивающим стабильную работу мембран.

Анализ литературных данных дает все основания полагать, что обратный осмос и нанофильтрация являются перспективными методами очистки сточных вод и с развитием промышленной базы по изготовлению мембран и соответствующей аппаратуры займут ведущее место в решении этой проблемы. Несмотря на то, что за последние годы зарубежными исследователями были проведены большие работы по изучению и опытно-промышленной реализации мембранных методов для очистки воды, многие вопросы очистки данных стоков исследованы недостаточно.

Возможность использования мембран отечественного производства для очистки сточных вод практически не изучена так же, как область и пределы применения мембранных методов для данных целей. Внешние факторы и предложенные корреляции по влиянию этих факторов на процесс разделения изучены в основном, на бинарных или модельных растворах. Ввиду этого, необходима экспериментальная проверка полученных зависимостей на многокомпонентных сточных водах.

Теория процесса пока не позволяет предсказать селективности и проницаемости мембран при различных условиях разделения. В связи с этим, для определения и расчета параметров процесса требуется проведение значительного числа экспериментов в системе мембрана – раствор.

Технологические схемы очистки воды с применением мембранных методов разработаны только для некоторых стадий производства, причем они не всегда предусматривают регенерацию растворенных веществ. Поэтому представляется необходимым усовершенствование технологических схем переработки сточных вод. В связи с этим, аппаратное оформление процесса мембранной обработки стоков требует своего решения.

Вышеизложенное определило цели настоящего исследования:

- 1) изучение возможности использования для очистки сточных вод различных мембран отечественного производства;
- 2) исследование влияния основных факторов на процесс очистки воды и проверка предложенных корреляций с учётом стабильности работы мембран по отношению к одно- и многокомпонентным растворам;
- 3) изучение возможных областей и пределов применения обратного осмоса и нанофильтрации для обработки стоков;
- 4) выяснение возможного срока

службы отечественных мембран и разработка требований в качестве полупроницаемых мембран; 5) разработка баромембранных технологических аппаратов для технологических схем очистки воды.

**Вторая глава** посвящена разработке баромембранных методов очистки воды. Исследования возможности применения мембран отечественного производства для очистки воды потребовали создания универсальных установок, которые позволяли бы использовать ячейки с разными мембранами и изучать влияние внешних факторов на процесс очистки воды.

Для опытов использовались экспериментальные установки двух типов. В установках первого типа для создания рабочего давления использовалось давление сжатого газа (азота). В мембранной ячейке из стали Х18Н9Т в качестве полупроницаемых перегородок использовались различные пленочные полимерные мембраны. Перемешивание жидкости в рабочей емкости установки осуществлялось лопастной мешалкой, приводимой во вращательное движение магнитами. Ячейка с магнитной мешалкой использовалась для определения рабочих характеристик и исследования процесса разделения с мембранами в виде пленок или пластин. Для проведения экспериментов при проточном движении разделяемого раствора относительно мембранной поверхности использовали установку с лабораторным аппаратом типа "фильтр-пресс".

На первом этапе исследование возможностей и характеристик разделения мембран осуществлялось на установке второго типа, в которой использовались проточные ячейки, где в качестве пористой основе применялись жестко-пористых структуры. Ячейка соединялась с гидроаккумулятором и плунжерным насосом для подачи раствора.

Опыты проводили на водных растворах различных солей. Анализ растворов, концентрация которых по ионам  $K^+$ ,  $Na^+$  и  $Ca^{2+}$  была не выше 100 мг/л, производили на плазменном фотометре ФПЛ-1. Анализы более концентрированных исходных растворов и фильтратов, включающих смеси одно- и двухвалентных солей, производили на Щелковском химическом заводе с использованием кондуктометрического и титрометрических методов анализа. Интерферометрический метод анализа с помощью интерферометра ИТР-1, дублировался, по мере необходимости, другими методами анализа, что позволяло производить анализы растворов в большей части исследуемых диапазонов концентраций. Результаты испытаний мембран различной структуры представлены в таблице 1.



Таблица 1 – Результаты испытаний мембран различной структуры

Материал мембран	Давление, Р, МПа	Исходный раствор	Селективность, $\phi$ , %	Проницаемость, G, л/м <sup>2</sup> ч
1	2	3	4	5
Керамика (партия 1)	6	0,1М NaCl	0	200
Керамика (партия 2)	6	0,1М NaCl	0	330
Керамика с осаждаемым полимерным веществом	6	0,1М NaCl	7,7	52
Углерод без осаждаемого вещества	6	0,1М NaCl	0	50
Углерод с осаждаемым веществом	6	0,1М NaCl	67,7	10,7
Пергамент	0,8	0,1М NaCl	0	11,3
Ацетатцеллюлоза (партия 1)	5	0,1М NaCl	98,7	8,4
Ацетатцеллюлоза (партия 2)	5	0,1М NaCl	99,1	7,3

Из таблицы 1 можно видеть, что наилучшими характеристиками обладают мембраны из ацетатцеллюлозы, на которых и проводились, в основном, исследования по изучению технологических параметров процесса очистки сточных вод.

Однако, было выявлено, что существенным недостатком ацетатцеллюлозных мембран (АЦМ) является невысокая стойкость в щелочных и кислых средах. В связи с этим были исследованы возможности и свойства мембран на основе неорганических материалов, стойких в щелочных и кислых средах.

Такие неорганические материалы использовались для получения других мембран, указанных в таблице 1, характеристики которых, как и случае использования АЦМ, менялись в течение всего времени их эксплуатации и поэтому не представляли интереса. Даже спустя 0,5-2,0 часа характеристики разделения не достигали постоянных величин.

Явления нестабильности наблюдались и при более детальном исследовании процесса с использованием АЦМ, каркасные структуры, которых были подвержены изменениям под воздействием температура, давления, концентрации исходных растворов, природы растворенных веществ и рН их среды (рисунок 1).

Нестабильность ацетатцеллюлозных полупроницаемых поверхностей ограничивает их применение для обратного осмоса. В связи с этим возникает необходимость проведения исследований с использованием жестко-пористых полупроницаемых поверхностей, к примеру, капиллярно-пористых стеклянных полупроницаемых поверхностей (КПМ), отвечающих условиям стабильности в более широком интервале рН. КПМ

– мембраны обладают кроме достоинств, характеризующих неорганическую природу используемых полупроницаемых поверхностей, некоторыми уникальными свойствами. Пористые капилляры получались из щелочно-боросиликатного стекла следующего состава (разработки НИИТС):

$\text{SiO}_2$  - 73-76%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 1 - 2%,  $\text{B}_2\text{O}_3$  - 14 - 17%,  
 $\text{Na}_2\text{O}$  - 3 - 4%, РБО - 5 - 6%.

Основные свойства полупроницаемых поверхностей из пористого стекла представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные свойства полупроницаемых поверхностей из пористого стекла

№ п.	Свойства	Значение показателей
1	Рабочие характеристики: селективность, % проницаемость, (л/м <sup>2</sup> ч) по отношению к NaCl	50-90 2-12
2	Прочность при растяжении капилляров, кг/мм <sup>2</sup>	2,7-3,0
3	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,4-1,8
4	Химическая стойкость	1-й гидр. класс
5	Структурные размеры пор, Å Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г Объем пор см <sup>3</sup> /г	20-50 230 0,23
6	Влагопоглощение, %	13±12
7	Модуль продольной упругости, кг/м <sup>2</sup>	2100-2300
8	Возможность стерилизации	Возможна
9	Возможность стерилизации	Возможна
10	Стабильность свойства при эксплуатации, сут.	Не менее 250

Как видно из таблицы 2, химическая стойкость и механическая прочность полупроницаемых поверхностей из пористого стекла выше, чем ацетатцеллюлозных мембран. Структурные характеристики капиллярно-пористых стеклянных полупроницаемых поверхностей определяли в институтах: "Физической химии РАН", "Электрохимии РАН", а также в РХТУ им. Д.И. Менделеева на факультетах "Технология неорганических веществ" и "Химическая технология силикатов" следующими методами: низкотемпературной адсорбцией; адсорбцией паров бензола при комнатной температуре; адсорбцией паров воды; ртутной порометрией; с помощью электронного микроскопа.

Исследовано влияние гидродинамических условий у поверхности мембраны на проницаемость и селективность мембран. Опыты проводились в ячейках с мембранами различной степени жесткости их пористой структуры с использованием как лабораторных, так и пилотных установок разных типов. При малых скоростях движения исходного раствора над поверхностью мембраны, когда использовалась установка с насосом марки НД100/250 и при малых числах оборотов мешалки, когда использовали установку с инертным газом, наблюдали ряд нежелательных явлений. К числу нежелательных явлений следует отнести повышение концентрации растворенных веществ у поверхности мембраны, отложение на поверхности мембраны коллоидных и малорастворимых веществ и, как следствие, снижение проницаемости. С другой стороны, увеличение скорости течения разделяемого раствора приводит и дополнительным затратам энергии на прокачивание жидкости. Целью исследования было установление оптимальной степени перемешивания для различных видов мембранных аппаратов, степени влияния концентрационной поляризации на стабильность характеристик процесса разделения. Анализ зависимостей проницаемости и селективности полимерных мембран от величины критерия  $Re$  приводит к выводу о наличии трех гидродинамических областей, в которых влияние  $Re$  оказывается различным. В первой области происходит быстрое возрастание проницаемости и селективности с увеличением числа  $Re$ . Затем начинается область, где скорость возрастания замедляется. В этой области наблюдается линейная зависимость характеристик процесса разделения от величины критерия  $Re$  вплоть до достижения третьей области, в которой проницаемость и селективность становятся постоянными (рисунок 1, график 1-1). Рассмотренный характер зависимости проницаемости от критерия  $Re$  можно понять, если учесть влияние концентрационной поляризации. С увеличением числа  $Re$  уменьшается толщина концентрационного пограничного слоя, нестабильность характеристики разделения АЦМ, как наиболее характерных представителей полимерных мембран имела место во всех случаях исследования.

Изучено влияние давления на селективность и проницаемость мембран. Анализ полученных зависимостей показывает, что в изученном интервале давлений проницаемость и селективность ацетатцеллюлозных пленок (рисунок 1, график 1-2), по мере увеличения рабочего давления сначала возрастают, затем при некотором давлении достигают максимальных значений, и при последующем увеличении давления уменьшаются, что объясняется деформированием структуры полимерной мембраны при ее сжатии.

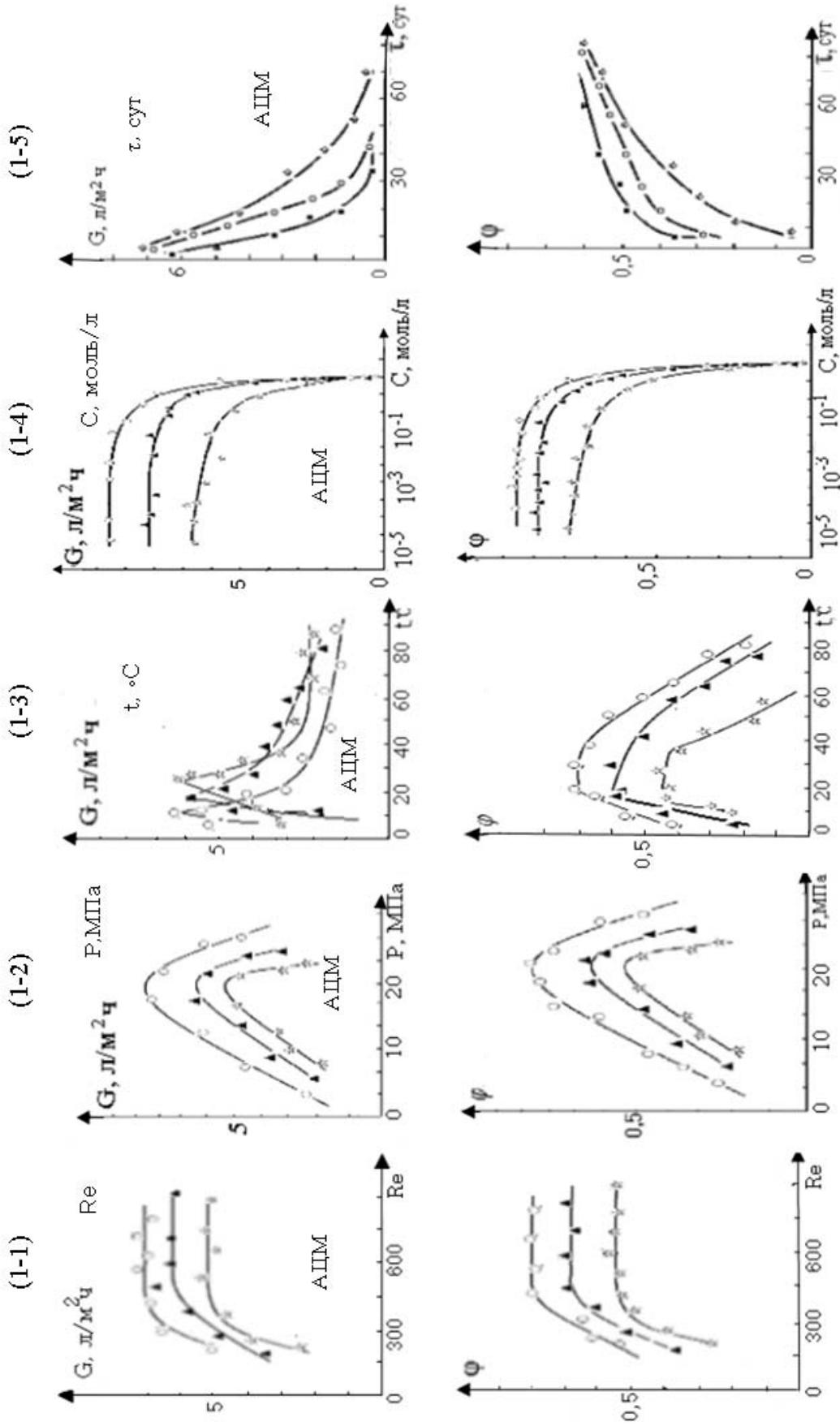


Рисунок 1 – Зависимость проницаемости и селективности АПМ от внешних факторов

Исследовано влияние температуры на стабильность характеристик разделения полупроницаемых мембран (рисунок 1, график 1-3). Это необходимо не только для более глубокого познания механизма явления полупроницаемости, но и для выбора оптимальных условий эксплуатации мембранных установок при повышенных температурах. Поскольку ацетатцеллюлозные мембраны не могут использоваться при температурах разделяемого раствора выше  $40^{\circ}\text{C}$ , исследования влияния температуры на стабильность характеристики процесса очистки воды проводились с применением жестко-пористых мембран, в частности, на основе Br-Si полупроницаемых поверхностей. На основании исследований влияния температуры на проницаемость и селективность мембран показано, что с повышением температуры разделяемого раствора проницаемость возрастает обратно пропорционально вязкости фильтрата во всем изученном интервале температур. Температурные зависимости для КПМ-мембран показаны на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, проницаемость и селективность Br-Si мембран повышаются с ростом температуры. При этом изменения характеристик разделения по знаку не наблюдалось.

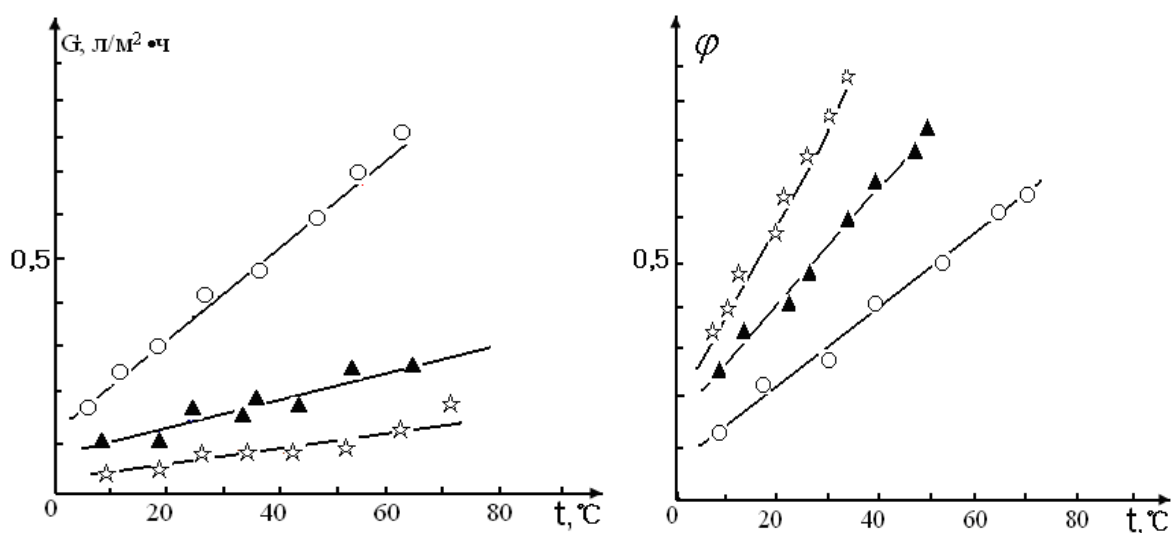


Рисунок 2 - Температурные зависимости характеристик КПМ-мембран

- 1% водный раствор  $\text{CaCl}_2$
- ▲—1% водный раствор  $\text{NaCl}$
- ☆—1% водный раствор  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$

Исследованы зависимости проницаемости и селективности мембран от концентрации разделяемого раствора (рисунок 1, график 1-4). С увеличением концентрации разделяемого раствора проницаемость мембран различной жесткости пористой структуры нелинейно уменьшаются. При определенной концентрации исходного раствора проницаемость ацетатцеллюлозных обратноосмотических мембран становится равной нулю. Для мембран с невысокими селективностями

небольшая остаточная проницаемость наблюдается и при более высоких концентрациях, что, видимо, связано с существованием у этих мембран крупных, мало селективных пор. Характер зависимости проницаемости от концентрации разделяемого раствора может быть объяснен исходя из сущности метода обратного осмоса. Увеличение концентрации растворенных веществ приводит к увеличению осмотического давления, что снижает эффективную движущую силу процесса, при этом увеличение концентрации исходного раствора приводит к возрастанию вязкости его, а также фильтра. Кроме того, в сточных водах содержатся взвешенные вещества, которые осаждаются на поверхности мембран. Все это вызывает снижение проницаемости.

Нестабильность работы АЦМ наблюдалась на протяжении 70 суток (рисунок 1, график 1-5).

**Третья глава** посвящена разработке конструкций баромембранных аппаратов. Отсутствие результатов по испытанию мембран в реальных условиях является серьезным препятствием для проектирования производственных систем обратного осмоса, использующих мембраны различной стабильности характеристик разделения, включая полупроницаемые Br-Si мембраны. В частности, это препятствовало правильной оценке возможной степени разделения мембран, определению необходимой поверхности мембран, выбору гидродинамического режима в аппаратах. Возникла необходимость в разработке универсальных безкорпусных аппаратов, а также аппаратуры с усовершенствованными герметичными разъемными соединениями жестких мембран.

Безкорпусные баромембранные аппараты с мембранами жесткого типа были разработаны в двух модификациях: проточном и тупиковом исполнении. Аппараты первой модификации представляют собой симметрично ориентированное по проекционным осям изделие, внутри которого находится одна или несколько цилиндрической формы жестких мембран, оси которых направлены вдоль потока исходного раствора. Собранный таким образом элемент из трубок или пучка трубок помещается между двумя фланцами, внешние формы которых соответствуют внешним формам пучка трубок. Герметизация на стыке трубка-пластина осуществляется листовой прокладкой из специально подобранного по жесткости и температурной устойчивости материала. Герметизация между фланцами и пластиной достигается с помощью резиновой прокладки в форме тор - кольца. Безкорпусный баромембранный аппарат второй модификации предложен в тупиковом исполнении с обычным штуцером подсоединения.

Разработка аппаратов первого и второго типа позволила использовать их для формирования многосекционных аппаратов с целью повышения их производительности. Группы мембран располагались в специально разработанных для этого обоймах, назначение которых

состояло в том, чтобы мембраны надежно фиксировались и легко менялись посекционно. Между секциями мембран с обоймами находятся опорные диски с переточными отверстиями для исходного раствора и проточками для размещения в них прокладок типа «тор-кольцо», которые вплотную прижимаются к торцовым пластинам с одной стороны и опорному диску с другой, обеспечивая герметичность разъемных трубчатых соединений. Наличие в аппарате плоских жестко-упругих прокладок делает возможным осуществить многократную разборку и сборку аппаратов без нарушения герметичности.

Аппараты корпусные с сальниковыми коробками для жестких мембран были разработаны в связи с тем, что фильтрующие элементы, которые имели сравнительно небольшие диаметры, были хрупкими. Такие аппараты позволяют осуществлять промывку мембран непосредственно в рабочем цикле при продавливании жидкостной, газовой или газожидкостной среды, которая подается в аппарат через штуцера для фильтрата. При этом слив промывочной жидкости осуществляется через рабочие штуцера подачи исходной жидкости и выхода ее из аппарата через открытый регулировочный вентиль сброса излишнего давления. Аппараты зарекомендовали себя, как надежные в эксплуатации. Легко разбираются и собираются при замене элементов фильтрации и вынужденной механической чистке.

В связи с выявлением эффекта влияния температуры на характеристики разделения мембран в баромембранных процессах были сконструированы аппараты, в которых производительность процесса увеличивали при нагревании исходных растворов, которые продавливали через полупроницаемые перегородки различных геометрических форм. В качестве модельного аппарата использовали аппарат, который снабжен элементом нагрева в виде нихромовой спирали. Нихромовая спираль нагревателя окружена кольцами изоляции для предотвращения замыкания «на корпус». В верхней части аппарата размещается игольчатый угловой вентиль с сальниковым уплотнением. Поверхность разделения аппаратов увеличивали вариацией габаритных размеров аппарата. Многотрубчатый аппарат с температурным обогревом обеспечивал высокую производительность жестких мембран.

Для пофракционного разделения исходных растворов разработан многосекционный безкорпусный аппарат с торцовыми уплотнениями. Аппарат идентичен ранее разработанному безкорпусному аппарату. Различие заключается в отсутствии обойм или стягивающих сеток и наличии мембран с различной пористостью в каждой из секций. Для мембран повышенной хрупкости с асимметричными геометрическими формами разработан аппарат пофракционного разделения с плавающими сальниковыми коробками. В разработанном аппарате мембраны мягко зажимаются без сколов при затяжке. При этом снимаются перенапряжения,

которые испытывают мембраны в процессе работы в условиях работы высоконапорного обратного осмоса, особенно при повышенных температурах исходных растворов.

Установки разделения обратным осмосом, которые применялись в экспериментах до настоящего исследования, включали в себя преимущественно насосы небольшой производительности. Проведенные исследования по влиянию гидродинамической обстановки на протекание баромембранного процесса показали, что существующие до настоящего исследования схемы и аппараты необходимо модернизировать для улучшения гидродинамики процесса. Важно отделять высоконапорные исследования от исследований низконапорного обратного осмоса. В связи с этим была осуществлена подборка насоса давления марки НД и разработана схема с применением насоса высокого давления. Снижение давления исходного раствора в аппарате обратного осмоса фиксировалось электроконтактным манометром, с помощью которого включалась цепь производительности установки. Включение насоса осуществлялось значительно чаще в связи с тем, что в силу несжимаемости жидкости от приложенного к ней давления выход небольшого количества фильтрата из системы вызывает снижение рабочего давления исходного раствора в системе до нескольких единиц МПа. Возникла угроза сгорания электродвигателя, который часто включался при больших пусковых токах, преодолевая давление на плунжер жидкости в несколько десятков МПа. При этом подвергалась гидравлическим ударам схема трубопроводов, аппаратура, запорно-регулирующая арматура и контрольно-измерительные приборы, поскольку жидкость несжимаема и удары по ней плунжера передавались по всей системе. Быстро изнашивалась латунная поверхность «зацепления Новикова», с помощью которого осуществлялась передача движения от электромотора к плунжерной паре. Ломались хрупкие капиллярно-пористые мембраны и выходили из строя системы их крепежа, а также выбивались прокладки и т.д. Приходили в негодность мембраны обратного осмоса. При разработке новой высокопроизводительной аппаратуры необходимо было устранить указанные недостатки и найти соответствующие условия для повышения надежности работы насосов. Гидравлические удары в высоконапорных аппаратах обратного осмоса были устранены путем применения сжатого инертного газа. Схема с применением статического давления инертного газа встраивалась в разработанную схему, в которой давление исходного раствора и гидродинамика обеспечивалась насосом.

**В четвертой главе** изложены результаты верификации предложенных принципов и конструкций баромембранных аппаратов для очистки воды. Предложенные конструкции баромембранных аппаратов были опробованы в различных областях: 1) при получении питьевой воды путем удаления соединений железа, микроэлементов и органических



соединений с помощью нанофильтрации с селективностью 80-90%; 2) при получении чистой воды для пищевой промышленности (алкогольные и безалкогольные напитки, медицина, дистиллированная вода) на обратноосмотических установках с селективностью 99,6%; 3) при получении высокоомной воды в электронной промышленности; 4) при постановке прецизионных экспериментов выделения особо чистых веществ. В любом случае вода, подаваемая на установки баромембранной очистки удовлетворяла следующим требованиям: мутность - не более 1,5 мг/л; содержание гуминовых веществ – не более 5 мгО<sub>2</sub>/л (по перманганатной окисляемости веществ); железо – не более 0.3 мг/л. В 1-й области использовались рекомендации по прогнозу момента замены полимерных мембран. Для 2, 3 и 4 областей в установках высоконапорного обратного осмоса опробованы рекомендации по конструктивному оформлению отдельных узлов с применением капиллярно-пористых мембран из боросиликатного стекла. Разработанные на аппарат рабочие чертежи внедрены на предприятии ИОООИ «Поддержка». Рекомендации по тонкому разделению элементов с близкими свойствами приняты лабораторией поверхностных явлений Института физической химии РАН.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выявлены диапазоны стабильности рабочих характеристик мембран различных типов в процессе краткосрочных и длительных периодов их эксплуатации при разных параметрах исходного раствора и значений внешних и внутренних факторов.

2. Выявлено, что среди всех аппаратов баромембранного разделения аппараты с капиллярно-пористыми мембранами имеют самые стабильные характеристики разделения.

3. На основе количественной оценки распределения пор по размерам установлено, что химическая стойкость и механическая прочность капиллярно-пористых мембран на боросиликатной основе значительно выше, чем у ацетатцеллюлозных мембран. Кассетные аппараты из набора мембранных элементов с различными фиксированными размерами пор открывают возможность создания баромембранных установок для пофракционного разделения многокомпонентных систем.

4. Вскрыто влияние гидратирующей способности ионов на проницаемость и селективность мембран различной стабильности и жесткости пористой структуры. При концентрации водного раствора, близкой к границе полной гидратации, наблюдается прекращение процесса обратного осмоса.

5. Выявлены преимущества безкорпусных аппаратов баромембранного разделения, в которых используются разъемные соединения торцового типа полупроницаемая поверхность - трубная решетка.

6. Опробованы различные конструкции корпусных аппаратов, в которых для интенсификации разделения растворов использован температурный эффект.

7. Предложены конструкции баромембранных установок для пофракционного разделения многокомпонентных систем.

8. Выявлены преимущества конструкций баромембранных установок, в которых внутренняя герметизация рабочих элементов хрупких мембран осуществляется в сальниковых коробках плавающего типа.

9. Для устранения явлений кавитации и гидравлических ударов при эксплуатации высоконапорных аппаратов обратного осмоса предложено совмещение работы насосов давления с подачей сжатого инертного газа.

### **СПИСОК ОПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Захаров С.Л., Лю Яньцин, Ефремов А.В. Работа мембран обратного осмоса // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2010. №5(53). С.66 - 68.

2. Захаров С.Л., Ефремов А.В., Лю Яньцин. Продление ресурсов аппаратов баромембранного разделения // Ремонт, восстановление, модернизация. 2008. №12. С. 44 – 47.

3. Лю Яньцин. Разработка мембранных модулей для очистки промышленных сточных вод // Естественные и технические науки. 2006. №3. С. 246 – 247.

4. Лю Яньцин, Захаров С.Л., Дорохов И.Н. Расчет гидродинамики в межтрубном пространстве // Естественные и технические науки. 2006. №2(22). С. 29 – 31.

5. Лю Яньцин, Захаров С.Л., Алексеенков С.А., Гаев А.Н. Оптимальный состав рабочей группы регулируемых по скорости вращения рабочих колес насосов // Деп. ВИНТИ №283. В 2007. С.1-11.

6. Лю Яньцин, Захаров С.Л. Элементы объемно-геометрического моделирования полупроницаемых процессов обратного осмоса и гидратация ионов // Объединенный научный журнал. 2006. №28. С.55-56.

7. Лю Яньцин, Захаров С.Л., Ефремов А.В. Течение пермеата внутри полого волокна // Техника и технология. 2006. №2(14). С.73-76.