

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 541.64; 544.77

**ГЛЕВИЦКАЯ**  
**Татьяна Александровна**

**ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ  
МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРСУЛЬФОНА**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата химических наук**  
**по специальности 02.00.04 – физическая химия**

Минск, 2022

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Научный руководитель: **Бильдюкевич Александр Викторович**, академик, доктор химических наук, профессор, директор «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Официальные оппоненты: **Иванец Андрей Иванович**, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, доцент, Министр образования Республики Беларусь  
**Глоба Анастасия Ивановна**, кандидат химических наук, доцент, заместитель начальника Научно-исследовательской части Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Оппонирующая организация: Государственное научное учреждение «Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси»

Защита диссертации состоится «21» октября 2022 г. В 14.00 на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.24.01 при Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» по адресу: 220072, г. Минск, ул. Сурганова, 13, к. 402, e-mail: secr@ifoch.bas-net.by, тел./факс: (375 17) 272-16-79.

С диссертацией можно ознакомиться в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» и на сайте <https://ifoch.by>.

Автореферат разослан « 15 » сентября 2022 г.

Ученый секретарь  
Совета по защите диссертаций Д 01.24.01  
кандидат химических наук



С. А. Праценко

## ВВЕДЕНИЕ

Ультрафильтрационные мембраны из полиэфирсульфона (ПЭС) в силу целого комплекса потребительских свойств находят широкое применение в различных отраслях промышленности для водоподготовки, очистки сточных вод промышленных предприятий; фракционирования молочных продуктов, разделения, очистки и концентрирования белковых растворов и др. Получение ультрафильтрационных мембран из ПЭС осуществляют методом инверсии фаз по мокрому способу формования. Несмотря на значительный накопленный опыт по получению ПЭС-мембран, до сих пор остается недостаточно изученным один из фундаментальных вопросов мембранного материаловедения: влияние жесткости (числа осаждения) нерастворителя в формовочном растворе на физико-химические свойства формовочных растворов, структуру и транспортные свойства мембран, полученных на их основе.

Одной из главных проблем при использовании полимерных мембран является их загрязнение в процессе эксплуатации (membrane fouling), что проявляется в снижении производительности, изменении селективных свойств, необходимости частой химической регенерации. С целью минимизации последствий загрязнения мембран проводится их модификация, направленная, как правило, на гидрофилизацию селективного слоя. В последние годы наметилась тенденция к дополнительной оптимизации физико-химических свойств поверхности полимерных мембран посредством использования различных функциональных макромолекул, способных не только повышать гидрофильность селективного слоя мембран, но и обратимо изменять свои свойства при варьировании внешних условий (рН, ионной силы, температуры, электрического или магнитного поля). Так, все более широкое распространение получают гидрофильные рН-чувствительные (pH-sensitive) мембраны. К главным достоинствам рН-чувствительных мембран можно отнести их способность к самоочищению при изменении рН среды. Основные способы получения гидрофильных рН-чувствительных мембран, включающие обработку уже готовой мембраны путем нанесения (адсорбции) или прививки функциональных рН-чувствительных ионогенных полимеров к поверхности мембраны, имеют ряд недостатков (снижение удельной производительности мембран, постепенное вымывание модифицирующего слоя в процессе эксплуатации и др.) или, как в случае прививки, не рассчитаны на крупномасштабное получение функциональных мембран, а в основном могут быть реализованы только в лабораторных условиях. В связи с этим поиск альтернативных методов модификации мембран, потенциально позволяющих получить гидрофильные рН-чувствительные полимерные мембраны, является актуальным.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами (проектами), темами.** Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., а именно направлению 8 «Многофункциональные материалы и технологии», утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы»; направлению 2.6 «Новые и усовершенствованные материалы и технологии водоподготовки и очистки питьевых, технических и сточных вод, газовых сред» и направлению 4.2 научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг. «Лечебные, диагностические, профилактические и реабилитационные технологии, клеточные и молекулярно-биологические технологии в медицине, аппараты и приборы медицинского назначения», утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. № 585.

Диссертационная работа выполнялась в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» в лаборатории мембранных процессов в рамках задания № 6.10 «Физико-химические основы получения мембран для диффузионных процессов разделения с использованием полимерных систем с верхней критической температурой смешения» подпрограммы «Полимерные материалы и технологии» государственной программы научных исследований (ГПНИ) Республики Беларусь на 2016–2020 гг. «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (№ госрегистрации 20160556); в рамках задания № 2.18 «Разработка модифицированных и органо-минеральных мембран и гибридных процессов на их основе для очистки сточных вод и технологических сред» подпрограммы «Полимеры и композиты» государственной программы научных исследований Республики Беларусь на 2011–2016 гг. «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал» (№ госрегистрации 20112183); задания № 4.07 «Разработка методов комплексной переработки животного сырья и отходов фракционирования донорской плазмы крови для получения лабораторных диагностических реагентов медицинского назначения» подпрограммы «Химфармсинтез» ГПНИ на 2011–2012 гг. «Фундаментальная и прикладная медицина и фармацевтика» (№ госрегистрации 20112538); гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) № X18МС-018 «Новые мембранные материалы для обработки технологических сред в целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности» (№ госрегистрации

20181509, 2018–2020 гг.); гранта БРФФИ № X18M-044 «Новые мембранные материалы на основе полиэфирсульфона» (№ госрегистрации 20181268, 2018–2020 гг.).

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы – установить физико-химические закономерности получения ультрафильтрационных мембран на основе системы полиэфирсульфон – нерастворитель – растворитель методом инверсии фаз и разработать методы модификации ПЭС-мембран. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- выяснить влияние жесткости нерастворителя в трехкомпонентных системах ПЭС – нерастворитель – диметилацетамид (ДМАА) на их фазовое состояние и вязкостные свойства;
- установить взаимосвязь степени насыщения формовочного раствора и жесткости (числа осаждения (ЧО)) нерастворителя со структурой и свойствами полиэфирсульфоновых мембран;
- изучить закономерности формирования плоских и полуволоконных ультрафильтрационных мембран на основе полиэфирсульфона;
- установить закономерности гидрофилизации ПЭС-мембран путем введения добавок амфифильных сополимеров в формовочный раствор;
- исследовать возможность поверхностной модификации мембран с использованием водных растворов полиэлектролитов в качестве осадительной (коагуляционной) ванны;
- определить области практического применения разработанных ПЭС-мембран.

**Объекты исследования:** многокомпонентные полимерные системы ПЭС – нерастворитель – диметилацетамид, мембраны, полученные на их основе, ПЭС-мембраны с дополнительно модифицированной поверхностью.

**Предмет исследования:** фазовое состояние и вязкостные свойства формовочных растворов, пористая структура и транспортные свойства мембран.

Выбор объектов и предмета исследования обусловлен отсутствием систематизированных данных о влиянии добавок нерастворителя в формовочные растворы (в качестве порообразователя) на свойства ПЭС-мембран, необходимостью комплексного анализа систем ПЭС – нерастворитель – растворитель, а также перспективностью использования высокопроизводительных, устойчивых к загрязнению ПЭС-мембран для мембранного разделения жидких сред.

**Научная новизна работы.** В работе впервые показано, что структура и свойства ультрафильтрационных ПЭС-мембран зависят не только от степени насыщения формовочного раствора, но и от жесткости (ЧО) нерастворителя, введенного в его состав. Установлена корреляция между жесткостью нерастворителя и степенью насыщения формовочного раствора со структурой и

производительностью ПЭС-мембран. Проведен сравнительный анализ структуры и свойств полволоконных и плоских мембран, полученных из одного и того же состава формовочной композиции. Показано, что для плоских мембран характерна анизотропная губчатая структура, в то время как в случае полых волокон (ПВ) дренажный слой пронизан пальцеобразными макрооидами. Сделан вывод, что формирование макрооидов, а также на порядок более высокая производительность ПВ обусловлены: 1) блокированием усадочных явлений путем подачи в фильеру внутреннего осадителя под давлением; 2) нарушением целостности (микроразрывами) формирующегося селективного слоя в результате фильерной вытяжки волокна в воздушном зазоре. Полученные результаты позволяют углубить представления о формировании структуры полимерных мембран методом инверсии фаз по мокрому способу формования.

Предложен метод модификации селективного слоя ПЭС-мембран амфифильным триблоксополимером полиэтиленоксида и полипропиленоксида Synperonic F108. Установлено, что макромолекулы Synperonic F108 локализуются преимущественно на поверхности селективного слоя мембран, что обусловлено амфифильной природой сополимера.

Впервые предложен метод модификации ПЭС-мембран в процессе инверсии фаз, заключающийся в использовании в качестве коагуляционной ванны водных растворов полиэлектролитов. Установлено, что введение в состав коагуляционной ванны полимерных флокулянтов приводит к эффективной гидрофиллизации мембран, а использование в качестве осадительной ванны водных растворов полиакриловой кислоты – к получению гидрофильных рН-чувствительных мембран, характеризующихся повышенной производительностью и устойчивостью к загрязнению в процессе эксплуатации. Эффективность модифицированных мембран подтверждена в процессе фракционирования технологических сред, образующихся при производстве волокнистого полуфабриката для получения бумаги и картона, с целью выделения гемицеллюлозы для дальнейшей переработки.

**Практическая значимость полученных результатов.** На основании проведенных исследований в ИФОХ НАН Беларуси организовано производство полволоконных мембран на основе полиэфирсульфона методом свободного прядения. Разработанные полволоконные мембраны использованы для комплектации промышленных мембранных элементов установки ультрафильтрации на мини-ТЭЦ «Восточная» РУП «Витебскэнерго», а также поставлены в Российскую Федерацию в рамках хозяйственных договоров №176-19 и № 222-19 с ООО «Ю-Фильтр».

Практическая значимость работы подтверждена наличием патентов на изобретение № 21994 «Антимикробное средство для молодняка крупного рогатого скота»; № 22020 «Способ получения иммуностимулирующего

препарата для профилактики и лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта у молодняка крупного рогатого скота»; № 21988 «Способ получения антимикробного средства».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты впервые проведенного исследования по определению влияния жесткости нерастворителя на морфологию и транспортные свойства мембран, полученных на основе системы ПЭС – нерастворитель – растворитель.
2. Способ направленной модификации полиэфирсульфоновых мембран путем введения в формовочные растворы добавок амфифильного триблоксополимера Synperonic F108, обеспечивающий получение гидрофильных мембран с повышенной устойчивостью к загрязнению.
3. Новый метод модификации ПЭС-мембран, заключающийся в использовании в качестве осадителя водных растворов полиэлектролитов (полиакриловой кислоты или высокомолекулярных флокулянтов Praestol 859 и Praestol 2540), позволяющий получать гидрофильные, рН-чувствительные, а также устойчивые к засорению мембраны.
4. Влияние основных параметров процесса формования полволоконных мембран на основе ПЭС методом свободного прядения на их структуру и свойства.
5. Ультрафильтрационное фракционирование активированного протромбинового комплекса для получения коагулогического реагента «Тромбин».

**Личный вклад соискателя** заключается в анализе научной и патентной литературы по теме диссертационного исследования, выполнении эксперимента, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций и представлении результатов на научных конференциях. Постановка цели и задач исследования, а также планирование экспериментов и обсуждение полученных результатов, их обобщение и изложение материалов в виде статей и докладов проводилось совместно с научным руководителем академиком А. В. Бильдюкевичем.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались и обсуждались на республиканских и международных конференциях и семинарах: 34-й летней научно-практической школе Европейского мембранного общества «Мембраны в биотехнологии» (Лунд, Швеция, 2017); Международной научной конференции молодых ученых «Молодежь в науке – 2018» (Минск, Беларусь, 2018); Международной научной конференции «Melpro – 2018» (Прага, Чехия, 2018); Международной научной конференции «Ионный транспорт в органических и неорганических мембранах»

(Сочи, Россия, 2018); XIV Всероссийской научной конференции «Мембраны – 2019» (Сочи, Россия, 2019).

Часть данной диссертационной работы была представлена в качестве проекта «Smart-мембраны для пищевой промышленности», одержавшего победу в номинации «Химические технологии, нефтехимия» на Республиканском конкурсе «100 идей для Беларуси – 2019».

Полученные в диссертации результаты использованы для изготовления ультрафильтрационных мембран и мембранных элементов в Государственном научном учреждении «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» при выполнении ряда хозяйственных договоров.

**Опубликование результатов диссертации.** По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 7 статей (6 статей – в зарубежных рецензируемых научных журналах, 1 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь), общее число авторских листов – 6,4; 9 тезисов докладов, получено 4 патента на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 171 страницу, в том числе 66 рисунков (на 38 страницах), 19 таблиц (на 6 страницах). Библиографический список, содержащий список использованных источников (291 наименование) и список публикаций соискателя (20 наименований), занимает 28 страниц.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**В первой главе** представлен литературный обзор, в котором обобщены основные литературные данные о получении полиэфирсульфоновых мембран. При этом литературный поиск не позволил выявить четкую взаимосвязь между жесткостью используемых добавок нерастворителей в формовочные растворы со свойствами и структурой мембран. В то же время показано, что жесткость нерастворителя определяет температурно-концентрационные границы устойчивости растворов полимеров и их вязкостные свойства, что, безусловно, должно сказываться на кинетике фазового разделения и свойствах получаемых мембран. Проанализированы основные подходы к модификации мембран. На основании анализа литературных данных сформулированы цель, задачи и основные направления исследований по теме диссертационной работы.

**Во второй главе** приводятся характеристики использованных в работе реагентов, описаны условия проведения экспериментов, представлены методики приготовления плоских и волоконных мембран. Характеристику мембран



проводили при помощи современных физико-химических методов анализа (сканирующая электронная микроскопия, атомная силовая микроскопия, ИК-спектроскопия и др.).

В третьей главе обсуждается получение полиэфирсульфоновых мембран методом инверсии фаз. На примере системы ПЭС – нерастворитель – ДМАА рассмотрено влияние степени насыщения формовочных растворов ( $\alpha^*$  – отношение количества нерастворителя, введенного в систему, к предельному – приводящему к распаду системы на фазы) и жесткости вводимого нерастворителя на структуру и свойства ультрафильтрационных мембран, получаемых по иммерсионному (мокрому) способу формования. Жесткость нерастворителя характеризовали числом осаждения (ЧО) – количеством нерастворителя, приводящим к фазовому разделению 100 мл 1 % раствора полимера. Для варьирования жесткости нерастворителя использовали смеси жесткого и мягкого нерастворителей для ПЭС, в качестве которых использовали глицерин (ЧО = 27,8 г/дл) и ПЭГ-400 (ЧО > 1000 г/дл) соответственно. Установлено, что в зависимости от степени насыщения формовочных растворов удельная производительность мембран по воде проходит через максимум (рисунок 1).

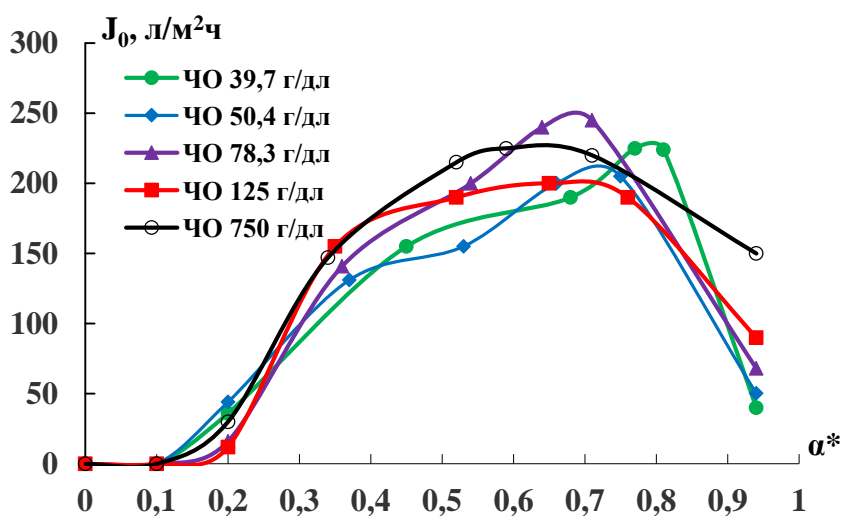
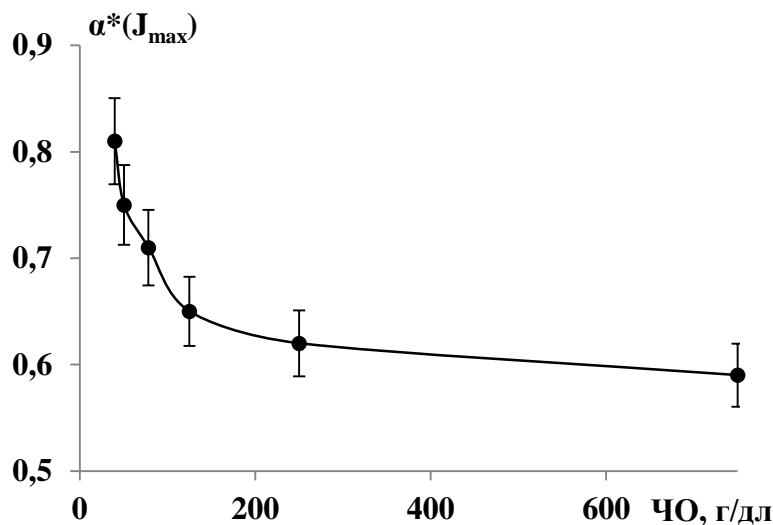


Рисунок 1. – Зависимость производительности мембран по дистиллированной воде от степени насыщения формовочного раствора для нерастворителей с различными значениями ЧО: 39,7 – 750 г/дл

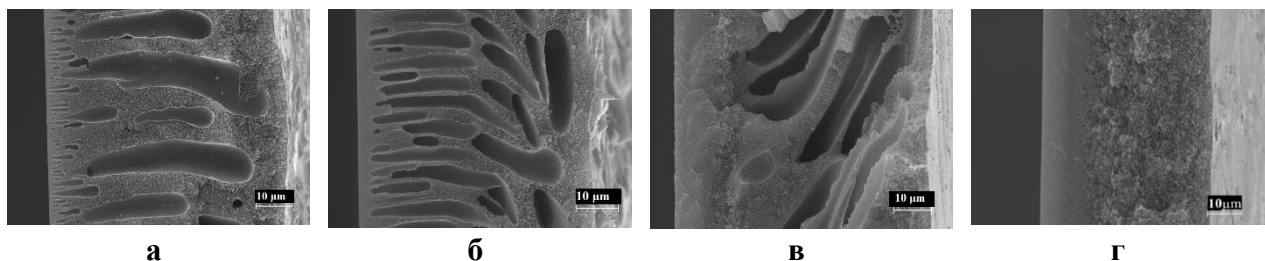
Минимальная производительность мембран для всех значений ЧО наблюдается при  $\alpha \leq 0,2$  и  $\geq 0,9$ . Оценка транспортных характеристик мембран показала, что область степеней насыщения формовочных растворов, которым соответствует максимальная производительность мембран по воде ( $\alpha^*(J_{\max})$ ), весьма ограничена. На рисунке 2 представлена зависимость  $\alpha^*(J_{\max})$  от ЧО нерастворителя. Установлено, что при увеличении ЧО нерастворителя наблюдается тенденция к снижению степени насыщения формовочного

раствора, которой соответствует максимальная производительность мембран по воде. Так, при увеличении ЧО нерастворителя с 39,7 до 750 г/дл  $\alpha^*(J_{\max})$  снижается с 0,81 до 0,59.



**Рисунок 2. – Зависимость степени насыщения мембран, которой соответствует максимальная производительность, от ЧО нерастворителя**

С увеличением степени насыщения формовочных растворов наблюдается переход от анизотропной структуры с большим количеством макроvoidов к формированию губчатой структуры при  $\alpha^* \geq 0,94$  (рисунок 3). Независимо от жесткости используемого нерастворителя структура мембран, полученных из растворов с  $\alpha^* = 0,94$  в поперечном сечении не претерпевает существенных изменений, однако методом атомно-силовой микроскопии установлено, что с увеличением ЧО нерастворителя существенно меняется форма структурных элементов, возрастает их размер и шероховатость поверхности мембран. Среднеквадратичная шероховатость поверхности ( $R_q$ ) и средняя шероховатость ( $R_a$ ) увеличились с 6,4 до 41,9 и с 8,2 до 58,0 нм соответственно, при изменении ЧО нерастворителя с 39,7 до 750 г / дл.



а

б

в

г

а – 0; б – 0,36; в – 0,72; г – 0,94

ЧО нерастворителя – 78,3 г/дл

**Рисунок 3. – СЭМ изображения поперечного скола ПЭС-мембран, полученных из формовочных растворов с различной степенью насыщения**

Установлено, что для мембран, полученных из формовочных растворов с  $\alpha^* \geq 0,94$ , увеличение ЧО нерастворителя также приводило к существенному возрастанию удельной производительности мембран по воде при незначительном снижении коэффициента задерживания (рисунок 4).

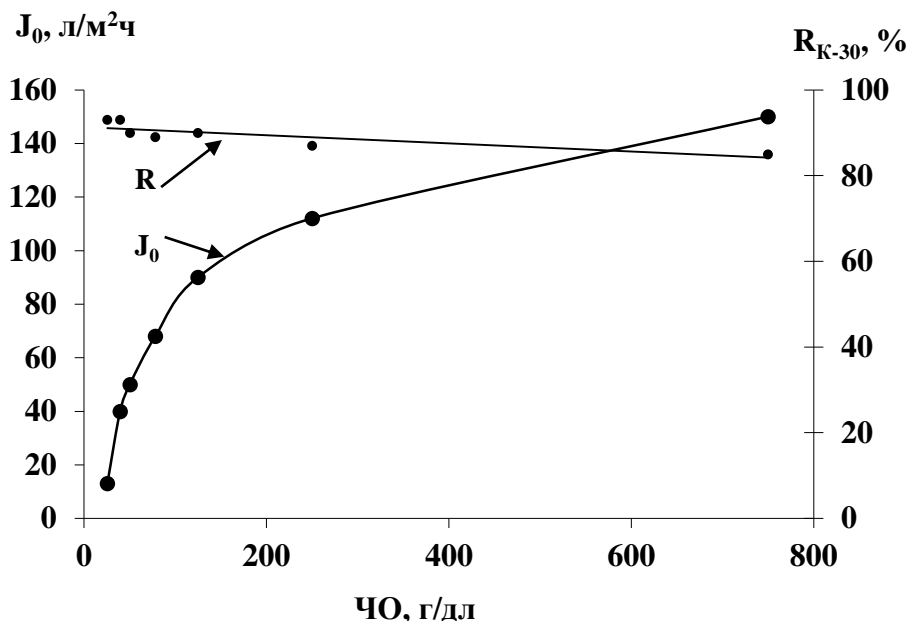
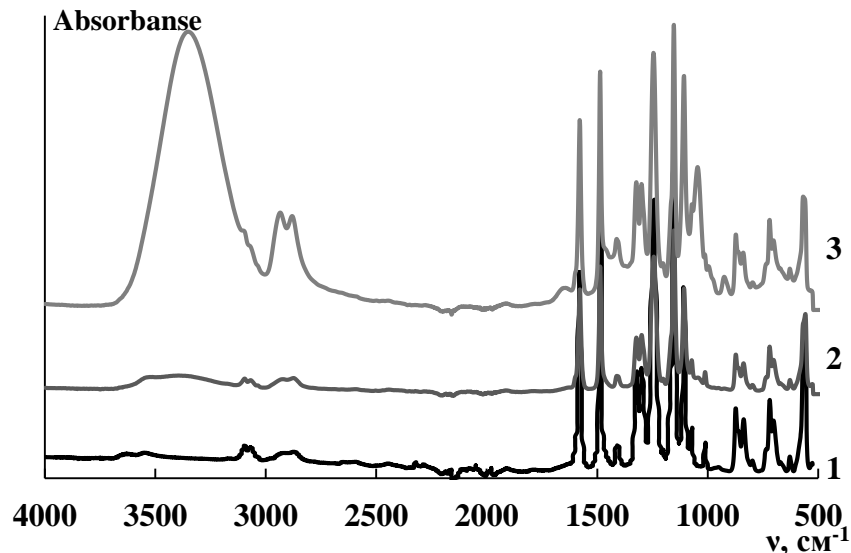


Рисунок 4. – Зависимость удельной производительности мембран по воде ( $J_0$ ) и коэффициента задерживания ( $R_{к-30}$ ) по ПВП К-30 от числа осаждения нерастворителя глицерин/ПЭГ-400

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что структура и свойства ультрафильтрационных ПЭС-мембран определяются не только степенью насыщения формовочного раствора, но и жесткостью (числом осаждения) используемого нерастворителя, что обуславливает различные концентрационные пределы устойчивости, вязкостные свойства формовочных растворов и сказывается на кинетике фазового разделения [3, 9, 13].

Одной из главных задач модификации является изменение гидрофильно-гидрофобного баланса поверхности с целью повышения производительности и предотвращения засорения мембран, облегчения их регенерации. В связи с этим **изучено влияние добавок амфифильного триблоксополимера полиэтиленоксида и полипропиленоксида Synperonic F108** в формовочные растворы ПЭС на структуру и свойства получаемых мембран. Установлено, что введение небольших количеств (0,3 – 0,5%) добавок Synperonic F108 приводит к повышению удельной производительности мембран по воде с 50 до 120 – 200 л/м<sup>2</sup>ч при сохранении высокой задерживающей способности и их эффективной гидрофилизации. Контактный угол смачивания по воде уменьшился с 65° до 41 – 42°. ИК-спектроскопические исследования показали, что Synperonic F108 локализуется преимущественно на внешней поверхности мембран (рисунок 5),

что обусловлено амфифильной природой триблоксополимера. Исследования структуры мембран методом СЭМ показали, что введение Synperonic F108 приводит к возрастанию общей ширины переходного слоя и уменьшению количества и размера макроvoidов в поддерживающем слое мембран. Модифицированные мембраны испытаны в процессе фракционирования технологических вод, образующихся при производстве волокнистого полуфабриката для получения бумаги и картона, с целью выделения гемицеллюлозы для дальнейшей переработки. Показано, что модифицированные мембраны, полученные с добавкой 0,5 % Synperonic F108, характеризуются в 2 – 6 раз более высокой производительностью и на 40 % большей устойчивостью к загрязнению. Коэффициент задерживания гемицеллюлозы для исходной и модифицированных мембран варьировался в пределах 95-97 %, в то время как коэффициент задерживания лигнина, в случае модифицированных мембран, был несколько ниже (14 – 19 %, для немодифицированной – 21 %) [1, 14].



1 – немодифицированная ПЭС-мембрана; 2 – изнаночная поверхность ПЭС-мембраны, модифицированной 0,5 % Synperonic F108; 3 – селективная поверхность ПЭС-мембраны, модифицированной 0,5 % Synperonic F108

Рисунок 5. – ИК-спектры ПЭС-мембран

**Предложен способ получения ультрафильтрационных мембран на основе полиэфирсульфона, реагирующих на изменение рН среды.** Способ заключается в использовании в качестве осадительной ванны (ОВ) водных растворов полиакриловой кислоты (ПАК). Введение 0,1 – 1,5 % ПАК в ОВ приводит к повышению удельной производительности мембран по воде с 50 до 108 – 288 л/м<sup>2</sup>ч в зависимости от рН (рисунок 6). Модифицированные мембраны обладают повышенной гидрофильностью (снижение контактного угла смачивания составляет 27 – 33° по сравнению с контрольным образцом), проявляют рН-чувствительность и рН-обратимость.

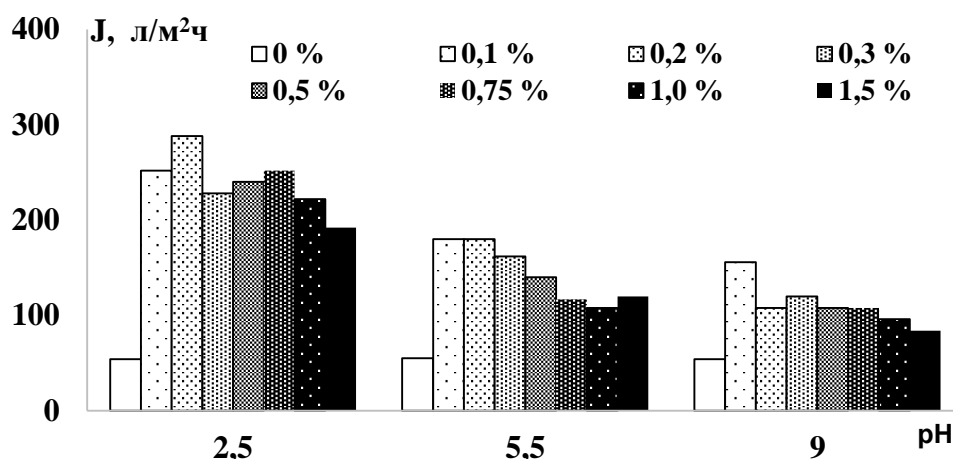
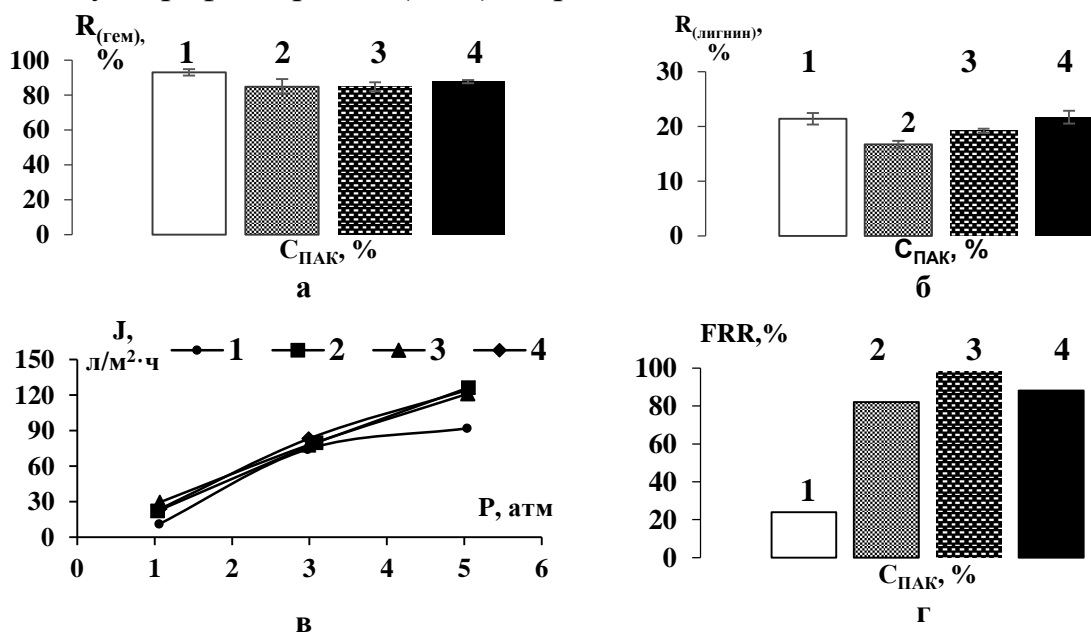


Рисунок 6. – Зависимость производительности ПЭС-мембран, приготовленных из осадительных ванн с различным содержанием ПАК, от pH питающего раствора

Модифицированные мембраны обеспечивают более высокую удельную производительность при ультрафильтрации технологических вод с целью выделения гемицеллюлозы (22,3 – 29,4 л/м²·ч·атм) по сравнению с исходной (11,2 л/м²·ч·атм) при близких показателях селективности и характеризуются повышенной устойчивостью к загрязнению (рисунок 7). В результате модификации мембран ПАК степень восстановления их производительности после ультрафильтрации (FRR) возрастает с 24 до 82 – 98 % [4, 11, 15].

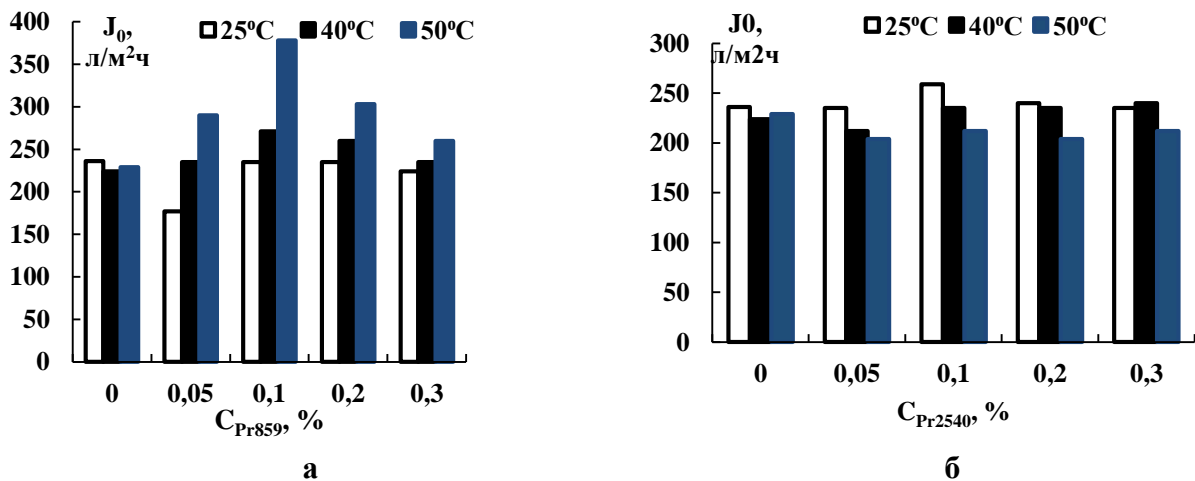


а, б – значения коэффициентов задерживания гемицеллюлозы ( $R_{(гем)}$ ) и лигнина ( $R_{(лигнин)}$ ); в – зависимость производительности мембран ( $J$ ) от давления; г – степень восстановления производительности мембран (FRR)  
концентрация ПАК в ОВ: 0% (1); 0,5 % (2); 1,0 % (3); 1,5 % (4)

Рисунок 7. – Транспортные свойства ПЭС-мембран, модифицированных ПАК, в сравнении с исходной мембраной в процессе фракционирования технологических сред целлюлозно-бумажной промышленности

На примере использования флокулянтов торговых марок Praestol 859 и 2540, представляющих собой высокомолекулярные ( $M_n = (10-14) \cdot 10^6$  г/моль)

полиэлектролиты на основе полиакриламида (катионный и анионный, соответственно) показана принципиальная возможность **модификации мембран в процессе инверсии фаз путем введения флокулянтов в осадительную ванну**. Преимущество использования для модификации мембран флокулянтов заключается в том, что флокулянты являются доступными и дешевыми модифицирующими агентами. Поскольку вязкость водных растворов флокулянтов зависит, как от их концентрации, так и от температуры осадительной ванны, было решено использовать для модификации мембран водные растворы флокулянтов как с различной концентрацией (0; 0,1 и 0,3 %), так и при различных температурах (25; 40 и 50°C). Установлено, что эффективная гидрофилизация селективного слоя мембран достигается уже при введении 0,1 % Praestol 859 или Praestol 2540 в осадительную ванну: регистрируется снижение контактного угла смачивания мембран с 64 – 66° до 50 – 54°. Дальнейшее увеличение концентрации флокулянтов в осадительной ванне с 0,1 до 0,3 %, а также повышение температуры осадительной ванны существенно не влияет на гидрофильные свойства селективного слоя мембран. Результаты определения транспортных характеристик исходных и модифицированных мембран приведены на рисунке 8.



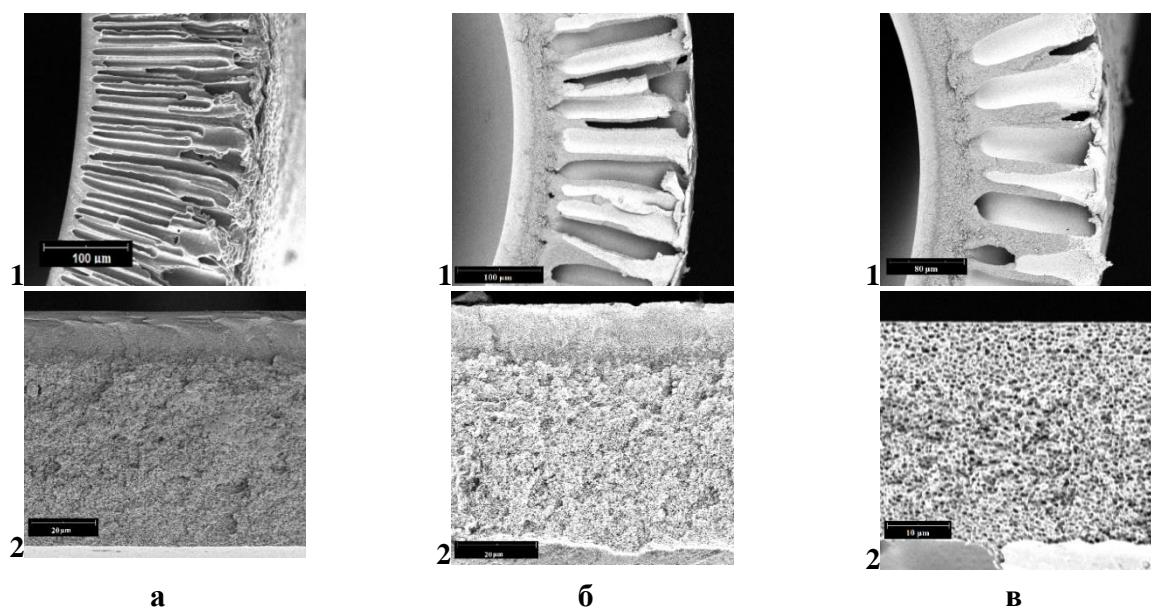
а – Praestol 859; б – Praestol 2540

Рисунок 8. – Зависимость удельной производительности мембран от концентрации флокулянта в осадительной ванне

Увеличение концентрации Praestol 859 с 0 до 0,3 % при  $T_{ОВ} = 25$  °C практически не сказывается на удельной производительности мембран, принципиально иная картина наблюдается при использовании ОВ с температурой 40 и 50 °C. Для данных температур регистрируется экстремальная зависимость производительности ПЭС-мембран от концентрации флокулянта в ОВ. Максимальная производительность (378 л/м²ч) зарегистрирована для мембран, полученных с использованием 0,1 % растворов Praestol 859 при  $T_{ОВ}=50$ °C [2]. Удельная производительность мембран, модифицированных с

использованием флокулянта Praestol 2540, не зависит ни от температуры, ни от концентрации флокулянта в ОВ и находится в диапазоне 204 – 259 л/м<sup>2</sup>ч [5].

На примере 25% раствора ПЭС со степенью насыщения  $\alpha^*=0,94$  изучено влияние основных параметров процесса **формования полволоконных (ПВ) мембран на основе** полиэфирсульфона методом свободного прядения. Проанализировано влияние скорости дозирования полимерного раствора, внутреннего осадителя, высоты воздушного зазора и температуры внутреннего осадителя на геометрические размеры, структуру и транспортные свойства мембран. Показано, что варьирование указанных параметров формования позволяет в широких пределах регулировать транспортные свойства получаемых мембран: производительность по дистиллированной воде в пределах 120 – 950 л/м<sup>2</sup>ч, коэффициент задерживания по ПВП К-30 в интервале 20 – 93 %. Установлено, что, несмотря на высокое значение степени насыщения формовочного раствора ( $\alpha^*=0,94$ ) поддерживающий (дренажный) слой ПВ ПЭС-мембран вне зависимости от режимов формования волокна, пронизан большим количеством макроvoidов (рисунок 9).



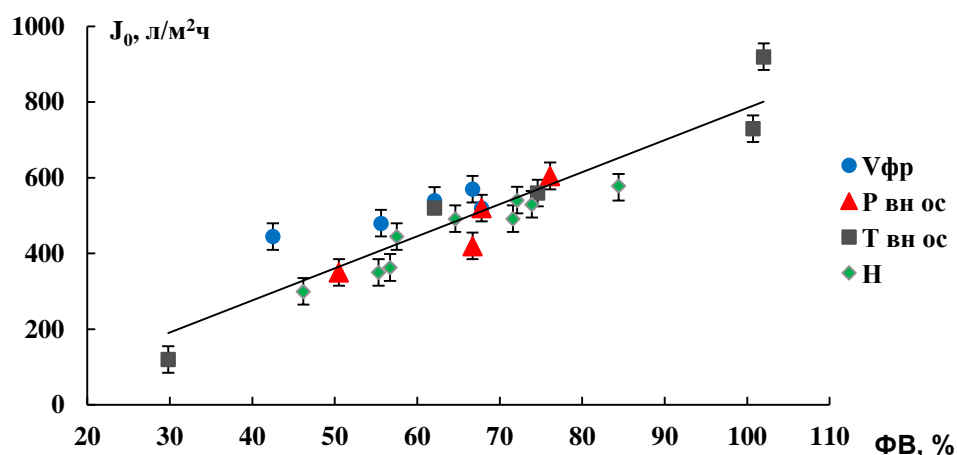
а – 20 °С; б – 39 °С; в – 85 °С

1 – полволоконная мембрана; 2 – плоская мембрана

**Рисунок 9. – Электронные микрофотографии поперечных сколов ПЭС-мембран, полученных при различных температурах осадительной ванны**

Для сравнения на рисунке 9 приведены также структуры поперечных сколов плоских ПЭС-мембран, полученных по мокрому способу формования из этого же формовочного состава с использованием подложки из полированного стекла. В поперечном сечении плоских мембран отсутствуют макроvoidы (вне зависимости от температуры ОВ), мембраны имеют асимметричную губчатую структуру, состоящую из селективного, переходного и дренажного слоев, при этом плоские ПЭС-мембраны обладали крайне низкой производительностью по

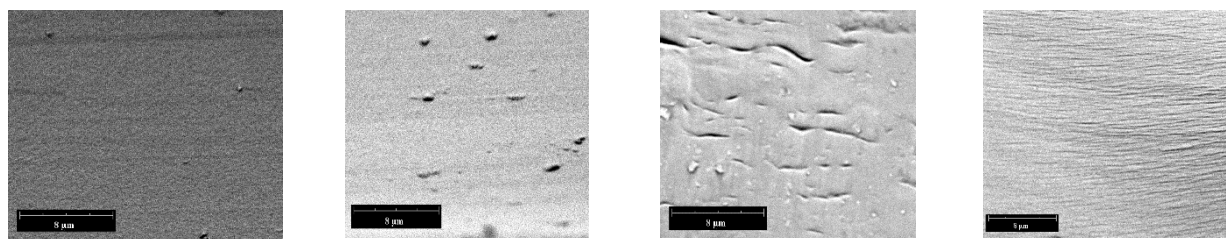
дистиллированной воде:  $J_0 = 3$  л/м<sup>2</sup>ч ( $T_{\text{ОВ}} = 25^\circ\text{C}$ ),  $J_0 = 12$  л/м<sup>2</sup>ч ( $T_{\text{ОВ}} = 39^\circ\text{C}$ ) и  $15$  л/м<sup>2</sup>ч ( $T_{\text{ОВ}} = 85^\circ\text{C}$ ) по сравнению с полыми волокнами (120-950 л/м<sup>2</sup>ч в зависимости от режимов формования). Более высокая производительность ПВ ПЭС-мембран объясняется подачей внутреннего осадителя под давлением, что препятствует протеканию усадочных явлений и частичным разрушением (деформацией) формирующегося полимерного каркаса при вытяжке волокна в воздушном зазоре. Установлено, что удельная производительность ПВ ПЭС-мембран линейно возрастает с увеличением фильерной вытяжки (ФВ) волокна независимо от того, варьированием какого параметра процесса формования это достигается (рисунок 10).



$H$  – высота воздушного зазора;  $V_{\text{фр}}$  – скорость дозирования формовочного раствора;  $P_{\text{вн ос}}$  – давление подачи внутреннего осадителя;  $T_{\text{вн ос}}$  – температура внутреннего осадителя

Рисунок 10. – Зависимость производительности ПВ ПЭС-мембран от ФВ для различных переменных

Методами СЭМ и АСМ показано, что увеличение ФВ приводит к росту доли взаимосвязанных пор на селективной поверхности ПВ ПЭС-мембран и трансформации формы пор от круглой к щелевидной (рисунок 11) [7].



а – ФВ=29,8%; б – ФВ=62,1%; в – ФВ=100,7%; г – ФВ=102,0%

Рисунок 11. – СЭМ селективной поверхности ПВ ПЭС-мембран, в зависимости от фильерной вытяжки

По исходным данным автора на базе Государственного научного учреждения «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» организовано опытно-



промышленное производство гидрофильных полуволоконных ПЭС-мембран и мембранных элементов на их основе. Разработанные ПВ ПЭС-мембраны были использованы для комплектации 24-х промышленных мембранных элементов установки ультрафильтрации мини-ТЭЦ «Восточная» филиала «Витебские тепловые сети» РУП «Витебскэнерго».

**В главе 4** исследована возможность фракционирования раствора активированного протромбинового комплекса методом ультрафильтрации. Для отделения тромбина от высокомолекулярных примесей использовали полуволоконную ультрафильтрационную мембрану на основе полиэфирсульфона с пределом отсечения 100 кДа (ПЭС-ПВ-100), последующее концентрирование целевого фильтрата выполняли на мембране из полисульфона ПС-ПВ-20 (производства ИФОХ НАН Беларуси). Использование ультрафильтрации позволяет осуществить эффективную очистку тромбина, выделенного из активированного протромбинового комплекса. Сравнительный анализ образцов с коммерческими аналогами коагулологического реагента «Тромбин» показал, что тромбин, выделенный с помощью ультрафильтрации, по своим показателям не уступает тромбину, выделенному хроматографическим путем [6]. На основании результатов исследования был разработан метод получения коагулологического реагента «Тромбин» [17] и организовано его производство (регистрационное удостоверение № ИМ-7.95040/1409, ТУ ВУ 100185198.102).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Впервые на примере формовочных растворов состава ПЭС – глицерин/ПЭГ-400 – ДМАА показано, что структура и свойства полиэфирсульфоновых ультрафильтрационных мембран определяются не только степенью насыщения формовочного раствора, но и жесткостью (числом осаждения) нерастворителя, введенного в состав полимерного раствора. Установлено, что производительность мембран в зависимости от степени насыщения изменяется экстремально с максимумом в области 0,59 – 0,81, при этом повышение ЧО нерастворителя способствует снижению степени насыщения, которой соответствует максимальная производительность мембран по дистиллированной воде. Вблизи бинодали (при  $\alpha^* = 0,94 - 0,95$ ) увеличение ЧО нерастворителя с 39,7 до 750 г/дл приводит к повышению производительности мембран с 13 до 150 л/м<sup>2</sup>ч при незначительном снижении коэффициента задерживания мембран по ПВП (К-30) с 93 до 85 %, вместе с тем с увеличением ЧО наблюдается возрастание толщины селективного слоя

мембран: при переходе от  $\text{ЧО} = 39,7 \text{ г/дл}$  к  $\text{ЧО} = 750 \text{ г/дл}$  толщина слоя возрастает с 1 до 4,5 мкм [3, 9, 13].

2. Предложен способ объемной модификации ПЭС-мембран, заключающийся во введении в состав формовочной композиции амфифильного триблоксополимера ПЭГ и ППГ Synperonic F108. На примере фракционирования технологических вод, образующихся при производстве волокнистого полуфабриката для получения бумаги и картона с целью выделения гемицеллюлозы для дальнейшей переработки установлено, что введение 0,5 % Synperonic F108 в состав формовочного раствора приводит к эффективной гидрофилизации мембран за счет локализации амфифильного сополимера на поверхности селективного слоя, увеличению производительности мембран в 2,3 – 5,7 раз (с 12,2 – 88,6 л/м<sup>2</sup>ч до 69,0 – 205,3 л/м<sup>2</sup>ч) при неизменной селективности и повышению устойчивости мембран к загрязнению (FRR увеличивается с 43,7 до 84,0 %) [1, 14].

3. Предложен новый способ модификации мембран в процессе инверсии фаз, заключающийся в использовании в качестве осадительной ванны водных растворов полиэлектролитов. Методом ИК-спектроскопии установлено, что макромолекулы полиэлектролитов локализуются преимущественно на селективной поверхности мембран, что позволяет эффективно управлять их транспортными свойствами. Использование 0,1 – 1,5 % водных растворов ПАК в качестве коагулянта позволяет получить рН-чувствительные, рН-обратимые мембраны, отличающиеся повышенной устойчивостью к уплотнению при наложении рабочего давления. При этом наиболее оптимальные эксплуатационные характеристики (производительность, селективность, устойчивость к загрязнению) достигаются при использовании в качестве ОВ 0,5 % водных растворов ПАК, а дальнейшее увеличение концентрации ПАК до 1,5 % практически не сказывается на свойствах мембран. Установлено, что в случае использования водных растворов флокулянтов торговой марки Praestol 859 и Praestol 2540 (высокомолекулярные полиэлектролиты катионный и анионный (соответственно) на основе полиакриламида) в качестве ОВ эффективная гидрофилизация селективного слоя наблюдается уже при использовании 0,1 % растворов. Эффективность модифицированных флокулянтами мембран подтверждена в процессе фракционирования технологических сред с целью выделения гемицеллюлозы. Модифицированные мембраны проявляют в 3,0 – 6,8 раз более высокую производительность при неизменной селективности и характеризуются повышенной устойчивостью к загрязнению по сравнению с немодифицированной мембраной [2, 4, 5, 8, 10 – 12, 15, 16].

4. Впервые установлено, что увеличение фильерной вытяжки, независимо от того, варьированием какого параметра процесса формования это достигается, приводит к возрастанию удельной производительности ПВ ПЭС-

мембран по воде. Показано, что рост ФВ ПВ ПЭС-мембран приводит к увеличению доли взаимосвязанных пор на поверхности селективного слоя и переходу от круглой формы пор к щелевидной. Установлено, что формирование макропор, а также существенно более высокая производительность ПВ-мембран являются следствием нарушения целостности (появления микроразрывов) формирующегося селективного слоя в результате вытяжки волокна [7].

5. Предложен новый метод выделения тромбина, заключающийся в проведении фракционирования раствора активированного протромбинового комплекса диафильтрацией. Для отделения тромбина от высокомолекулярных примесей использовали полученную в работе полуволоконную ультрафильтрационную мембрану на основе полиэфирсульфона (ПЭС-ПВ-100), концентрирование целевого фильтрата выполняли на мембране из полисульфона ПС-ПВ-20 (производства ИФОХ НАН Беларуси). По исходным данным автора на базе ИФОХ НАН Беларуси организован выпуск коагулологического реагента «Тромбин», по основным характеристикам не уступающего зарубежным аналогам [6, 17].

### **Рекомендации по практическому использованию**

Полученные данные были использованы для разработки технологий получения полимерных мембран на базе Государственного научного учреждения «ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ».

Половолоконные мембранные из полиэфирсульфона были использованы для комплектации 24 промышленных мембранных элементов автоматизированной модульной мембранной установки для очистки воды на мини-ТЭЦ «Восточная» филиала «Витебские тепловые сети» РУП «Витебскэнерго».

Перспективными областями применения разработанных мембран на основе ПЭС являются водоподготовка для теплоэнергетики, жилищно-коммунального хозяйства. Мембраны могут быть использованы в качестве подложек для газоразделительных мембран, концентрирования и разделения компонентов биологических сред в микробиологической и фармацевтической отраслях промышленности, в частности для получения антимикробных препаратов на основе фитолектинов [18 – 20].

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ****Статьи:**

1. Bilydukevich, A. V. The Modification of polyethersulfone membranes using a Synperonic F108 block copolymer and their application for the fractionation of thermomechanical pulp mill process water / A. V. Bilydukevich, T. A. Hliavitskaya, M. N. Kavalenka // *Membranes and Membrane Technologies*. – 2020. – Vol. 2, № 4. – P. 210–216.

1. Бильдюкевич, А. В. Модификация мембран из полиэфирсульфона с использованием блоксополимера Synperonic F108 и их применение для очистки технологических вод целлюлозно-бумажной промышленности / А. В. Бильдюкевич, Т. А. Глевицкая, М. Н. Коваленко // *Мембраны и мембранные технологии*. – 2020. – № 4. – С. 224–231.

2. Modification of PES ultrafiltration membranes by cationic polyelectrolyte Praestol 859: Characterization, performance and application for purification of hemicellulose / T. Hliavitskaya, T. Plisko, A. Bilydukevich, F. Lipnizki, G. Rodrigues, M. Sjolín // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2020. – Vol. 162. – P. 187–199.

3. Bilydukevich, A. Effect of Non-Solvent Additives to the Casting Solution on the Structure and Properties of Polyethersulfone UF Membranes / A. Bilydukevich, T. Hliavitskaya, G. Melnikova // *Journal of Membrane Science and Research*. – 2021. – Vol. 7, № 1. – P. 45–54.

4. The Modification of Polyethersulfone Membranes with Polyacrylic Acid / A. V. Bilydukevich, T. Hliavitskaya, S. Pratsenko, G. Melnikova // *Membranes and Membrane Technologies*. – 2021. – Vol. 3, № 1. – P. 24–35.

4. Модификация полиэфирсульфоновых мембран полиакриловой кислотой / А. В. Бильдюкевич, Т. А. Глевицкая, С. А. Праценко, Г. Б. Мельникова // *Мембраны и мембранные технологии*. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 28–39.

5. Development of antifouling ultrafiltration PES membranes for concentration of hemicellulose / T. Hliavitskaya, A. Bilydukevich, T. Plisko, F. Lipnizki, S. Pratsenko, G. Rodrigues, M. Sjolín // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2021. – Vol. 138, № 17. – P. 50316.

6. Глевицкая, Т. А. Выделение тромбина методом ультрафильтрации / Т. А. Глевицкая, А. В. Бильдюкевич // *Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук*. – 2022. – Т. 58, № 1. – С. 86–93.

7. Бильдюкевич, А. В. Влияние режимов формования на структуру и свойства полволоконных ультрафильтрационных мембран из полиэфирсульфона / А. В. Бильдюкевич, Т. А. Глевицкая, Т. Н. Невар // *Мембраны и мембранные технологии*. – 2022. – Т. 12, №. 4. – С. 1–12.

### Материалы конференций и тезисы докладов:

8. Hliavitskaya, T.A. Properties of polyethersulfone ultrafiltration membranes modified by the addition of polyelectrolytes / T. A. Hliavitskaya, M. N. Kavalenka, A. V. Bilydukevich // 34<sup>th</sup> EMS summer school membranes in biorefineries, Lund, 26–30 June 2017 : theses / Department of Chemical Engineering, Lund University ; ed.: A. S. Jonsson, F. Lipnizki. – Lund, 2017. – P. 63.

9. Hliavitskaya, T. A. New membranes based on polyethersulfone / T. A. Hliavitskaya, S. Pratsenko, A. V. Bilydukevich // III Ukrainian – Polish scientific conference «Membrane and sorption processes and technologies», Kyiv, 12–14 December 2017. – Ukraine, Kyiv, 2017. – P. 99.

10. Hliavitskaya, T. A. New method of modification polyethersulfone membranes / T. A. Hliavitskaya, A. V. Bilydukevich, M. N. Kavalenka // Melpro 2018, Conference on Membrane and Electromembrane Processes, Prague, 13–16 May 2018 / Group Mega – Czech Republic, Prague, 2018. – P. 225.

11. Hliavitskaya, T. Production and properties of polyethersulfone-polyacrylic acid pH-sensitive membranes / T. Hliavitskaya, A. Bilydukevich, V. Usosky // Ion transport in organic and inorganic membranes : materials of international conference, Sochi, 21-26 May 2018 : theses / Russian Academy of sciences ; ed.: A. V. Yaroslavtsev [et al.]. – Sochi, 2018. – P.112–114.

12. Глевицкая, Т. А. Новые мембраны на основе полиэфирсульфона / Т. А. Глевицкая, А. В. Бильдюкевич // Молодежь в науке – 2018 : тез. докл XV Международной научной конференции молодых ученых, Минск, 29.10–1.11 2018 г. / Национальная академия наук Беларуси – Минск, 2018. – С. 195–196.

13. Бильдюкевич, А. В. Получение полиэфирсульфоновых ультрафильтрационных мембран из систем полимер – растворитель – осадитель / А. В. Бильдюкевич, Т. А. Глевицкая // Мембраны – 2019 : материалы XIV Всероссийской научн. конф. с международным участием, Сочи, 21 – 25 окт. 2019 г. : тез. докл. / ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН ; редкол.: А.Р. Хохлов [и др.]. – Сочи, 2019. – С. 8–10.

14. Праценко, С. А. Модификация полуволоконных мембран из полиэфирсульфона с использованием блоксополимера Synperonic F108 / С. А. Праценко, Т. А. Глевицкая, А. В. Бильдюкевич, В. В. Усокий // Мембраны – 2019 : материалы XIV Всероссийской научн. конф. с международным участием, Сочи, 21 – 25 окт. 2019 г. : тез. докл. / ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН ; редкол.: А.Р. Хохлов [и др.]. – Сочи, 2019. – С. 265–267.

15. Глевицкая, Т. А. Модификация полиэфирсульфоновых мембран полиакриловой кислотой / Т. А. Глевицкая, А. В. Бильдюкевич, С. А. Праценко // Мембраны – 2019 : материалы XIV Всероссийской научн. конф. с

международным участием, Сочи, 21 – 25 окт. 2019 г. : тез. докл. / ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН ; редкол.: А.Р. Хохлов [и др.]. – Сочи, 2019. – С. 62–64.

16. Глевицкая, Т. А. Новый метод модификации мембран на основе полиэфирсульфона / Т. А. Глевицкая, А. В. Бильдюкевич, В. В. Усоский // Мембраны – 2019 : материалы XIV Всероссийской научн. конф. с международным участием, Сочи, 21 – 25 окт. 2019 г. : тез. докл. / ФГБУН Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН ; редкол.: А.Р. Хохлов [и др.]. – Сочи, 2019. – С. 256–258.

### **Патенты на изобретение:**

17. Способ получения тромбина : пат. ВУ 17409 / А. В. Бильдюкевич, Л. Е. Власов, Т.А. Павлович (Глевицкая). – Оpubл. 30.08.2013.

18. Антимикробное средство для молодняка крупного рогатого скота : пат. ВУ 21994 / О. Л. Канделинская, П. А. Красочко, А. В. Бильдюкевич, Е. Р. Грищенко, И. А. Красочко, Т.А. Глевицкая, Ю. В. Ломако, С. С. Кабась, И. А. Курбат. – Оpubл. 13.03.2018.

19. Способ получения антимикробного средства : пат. ВУ 21988 / О. Л. Канделинская, П. А. Красочко, А. В. Бильдюкевич, Е. Р. Грищенко, И. А. Красочко, Т.А. Глевицкая, Ю. В. Ломако, С. С. Кабась, И. А. Курбат. – Оpubл. 13.03.2018.

20. Способ получения иммуностимулирующего препарата для профилактики и лечения заболеваний желудочно-кишечного тракта у молодняка крупного рогатого скота : пат. ВУ 22020 / П. А. Красочко, И. А. Красочко, Ю. В. Ломако, С. С. Кабась, И. А. Курбат, О. Л. Канделинская, Е. Р. Грищенко, А. В. Бильдюкевич, Т.А. Глевицкая, А.И. Абдулов, В.И. Еремец. – Оpubл. 29.03.2018.

## РЕЗЮМЕ

Глевицкая Татьяна Александровна

### ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРСУЛЬФОНА

**Ключевые слова:** ультрафильтрация, мембраны, полиэфирсульфон, растворы полимеров, метод инверсии фаз, модификация мембран, число осаждения.

**Объекты исследования:** Многокомпонентные полимерные системы полиэфирсульфон (ПЭС) – нерастворитель – растворитель, мембраны, полученные на их основе, ПЭС-мембраны с дополнительно модифицированной поверхностью. **Предмет исследования:** фазовое состояние и вязкостные свойства формовочных растворов, пористая структура и транспортные свойства мембран.

**Методы исследования:** химические, оптические, вискозиметрические методы исследований, ИК-спектроскопия, сканирующая электронная и атомно-силовая микроскопия, определение производительности мембран, контактного угла смачивания и селективности мембран.

**Цель работы:** установить физико-химические закономерности получения ультрафильтрационных мембран на основе системы полиэфирсульфон – нерастворитель – растворитель методом инверсии фаз и разработать методы модификации ПЭС-мембран.

Проведено исследование закономерностей получения плоских и полуволоконных мембран на основе системы ПЭС – нерастворитель – растворитель в зависимости от жесткости нерастворителя и степени насыщения формовочного раствора. Изучено влияние добавок амфифильного триблок-сополимера полиэтиленоксида и полипропиленоксида Synperonic F108 в формовочные растворы ПЭС на структуру и свойства получаемых мембран. Предложен новый способ получения высокопроизводительных мембран из ПЭС, реагирующих на изменение рН раствора, заключающийся в использовании в качестве осадительной ванны водных растворов слабых полиэлектролитов. Разработан метод выделения тромбина из активированного протромбинового комплекса при помощи ультрафильтрации.

**Рекомендации по использованию и область применения:** перспективными областями применения разработанных мембран на основе ПЭС являются водоподготовка для теплоэнергетики, жилищно-коммунального хозяйства. Мембраны могут быть использованы в качестве подложек для газоразделительных мембран, концентрирования и разделения компонентов биологических сред в микробиологической и фармацевтической отраслях промышленности.

## РЭЗІЮМЭ

Глявіцкая Таццяна Аляксандраўна

### АТРЫМАННЕ І ЎЛАСЦІВАСЦІ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦЫЙНЫХ МЕМБРАН НА АСНОВЕ ПОЛІЭФІРСУЛЬФОНУ

**Ключавыя словы:** ультрафільтрацыя, мембраны, поліэфірсульфон, раствору палімераў, метады інверсіі фаз, мадыфікацыя мембран, лічбы асаджэння.

**Аб'екты даследавання:** Шматкампанентныя палімерныя сістэмы поліэфірсульфон (ПЭС) – нерастваральнік – растваральнік, мембраны, атрыманыя на іх аснове, ПЭС-мембраны з дадаткова мадыфікаванай паверхняй.

**Прадмет даследавання:** фазавы стан і вяскасныя ўласцівасці фармавальных раствораў, порыстая структура і транспартныя ўласцівасці мембран.

**Метады даследавання:** хімічныя, аптычныя, вісказіметрычныя метады даследаванняў, ІЧ-спектраскапія, сканавальная электронная і атамна-сілавая мікраскапія, вызначэнне прадукцыйнасці мембран, кантактнага вугла змочвання і селектыўнасці мембран.

**Мэта працы:** усталяваць фізіка-хімічныя заканамернасці атрымання ультрафільтрацыйных мембран на аснове сістэмы поліэфірсульфон – нерастваральнік – растваральнік метадам інверсіі фаз і распрацаваць метады мадыфікацыі ПЭС-мембран.

Праведзена даследаванне заканамернасцяў атрымання плоскіх і полавалаконных мембран на аснове сістэмы ПЭС – нерастваральнік – растваральнік у залежнасці ад жорсткасці нерастваральніка і ступені насычэння фармавальных раствораў. Вывучаны ўплыў дадаткаў амфіфільнага трыблок-супалімеру поліэтыленаксіду і поліпрапіленаксіду Synperonic F108 у фармавальных растворах ПЭС на структуру і ўласцівасці атрымоўваемых мембран. Прапанаваны новы спосаб атрымання высокапрадукцыйных мембран з ПЭС, рэагуючых на змену рН раствора, які складаецца ў выкарыстанні ў якасці каагуляцыйнай ванны водных раствораў слабых поліэлектралітаў. Распрацаваны метады вылучэння трамбіна з актываванага пратрамбінавага комплексу пры дапамозе ультрафільтрацыі.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання:** перспектыўнымі галінамі ўжывання распрацаваных мембран на аснове ПЭС з'яўляюцца водападрыхтоўка для цеплаэнергетыкі, жыллёва-камунальнай гаспадаркі. Мембраны могуць быць выкарыстаны ў якасці падложак для газараздзяляльных мембран, канцэнтравання і падзелу кампанентаў біялагічных асяроддзяў у мікрабіялагічнай і фармацэўтычнай галінах прамысловасці.



## SUMMARY

Hliavitskaya Tatsiana Alyaxandrauna

### PRODUCTION AND PROPERTIES OF ULTRAFILTRATION MEMBRANES BASED ON POLYETHERSULFONE

**Key words:** ultrafiltration, membranes, polyethersulfone, polymer solutions, phase inversion, membrane modification, coagulation value.

**Objects of study:** Multicomponent polymer systems polyethersulfone (PES) – non-solvent – solvent, PES-membranes prepared from such solutions, modified PES-membranes. **Subject of research:** phase state and viscosity properties of casting solutions, structure and properties of membranes.

**The methods of investigation:** chemical, optical, viscometric research methods, FTIR spectroscopy, scanning electron and atomic force microscopy, determination of membrane flux, contact angle and selectivity of membranes.

**The aim of the work:** to establish the physical and chemical patterns of preparation ultrafiltration membranes based on the polyethersulfone – non-solvent – solvent system via phase inversion and to develop methods for modifying PES-membranes.

Work has been carried out to obtain flat-sheet and hollow fiber membranes based on the PES – non-solvent – solvent system. The influence of the non-solvent coagulation value and the degree of saturation of the casting solution on the membrane properties was studied. The effect of additives of the amphiphilic triblock copolymer of polyethylene oxide and polypropylene oxide Synperonic F108 in PES casting solutions on the structure and properties of the resulting membranes was studied. A new method of pH-sensitive high-performance PES-membranes production was proposed. The method consisted in using aqueous solutions of weak polyelectrolytes as a coagulation bath. The method of isolating thrombin from an activated prothrombin complex by ultrafiltration was developed.

**Applications:** promising areas of application of the developed PES-membranes are water treatment for thermal power engineering and for housing and communal services. The membranes can be used as support for gas separation membranes, for concentration and separation of biological media components in the microbiological and pharmaceutical industries.

