

**ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ
СТРУКТУРНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН
ДЛЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ СИСТЕМ ГЛУБОКОЙ
ТЕХНИЧЕСКОЙ И ПИТЬЕВОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ**

Новосельский Игнатий Геннадьевич

*Старший преподаватель кафедры физической и коллоидной химии Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова
г. Москва, Россия*

Аннотация.

Настоящее фундаментальное исследование посвящено комплексной разработке физико-химических и технологических основ создания селективно-проницаемых мембранных структур нового поколения. В работе представлен глубокий теоретический анализ механизмов молекулярного транспорта в условиях градиента химического потенциала, базирующийся на расширенной модели свободного объема и теории растворения-диффузии. Рассмотрены многоаспектные процессы формирования активного селективного слоя методом межфазной поликонденсации на мезопористых подложках, а также методы направленной модификации их поверхности с использованием низкоразмерных углеродных аллотропов и гидрофильных полимерных щеток. Детально изучены кинетические закономерности биообрастания и концентрационной поляризации в зависимости от топологических параметров поверхности и электрокинетического потенциала мембраны. Результаты численного моделирования методами молекулярной динамики в сочетании с натурными экспериментами на модельных растворах сложного солевого состава подтверждают синергетический эффект повышения проницаемости и селективности при внедрении функционализированного оксида графена в полиамидную матрицу. Научная новизна работы заключается в обосновании термодинамических критериев стабильности нанокompозитных мембран при экстремальных эксплуатационных нагрузках. Практическая значимость исследования состоит в разработке научно-обоснованных рекомендаций по интенсификации мембранных процессов разделения в интересах экологической безопасности и ресурсосбережения.

Ключевые слова: мембранное разделение, обратный осмос, нанофильтрация, полимерные композиты, массоперенос, селективность, оксид графена, гидрофилизация поверхности, концентрационная поляризация, водоподготовка.

INNOVATIVE APPROACHES TO DESIGNING STRUCTURALLY MODIFIED POLYMER MEMBRANES FOR HIGH-TECH DEEP TECHNICAL AND DRINKABLE WATER TREATMENT SYSTEMS

Novoselsky Ignatij Gennadyevich

*Senior Lecturer of the Department of Physical and Colloid Chemistry Lomonosov
Moscow State University
Moscow, Russia*

Abstract.

This fundamental study is devoted to the comprehensive development of physicochemical and technological foundations for creating next-generation selectively permeable membrane structures. The paper presents a deep theoretical analysis of molecular transport mechanisms under chemical potential gradient conditions based on the extended free volume model and the solution-diffusion theory. Multidimensional processes of forming an active selective layer by interfacial polycondensation on mesoporous substrates are considered, as well as methods for directed modification of their surface using low-dimensional carbon allotropes and hydrophilic polymer brushes. Kinetic patterns of biofouling and concentration polarization depending on surface topological parameters and the membrane's electrokinetic potential are studied in detail. Results of numerical modeling by molecular dynamics methods combined with field experiments on model solutions of complex saline composition confirm a synergistic effect of increasing permeability and selectivity when incorporating functionalized graphene oxide into the polyamide matrix. The scientific novelty of the work lies in substantiating the thermodynamic criteria for the stability of nanocomposite membranes under extreme operational loads. The practical significance of the study consists in developing scientifically grounded recommendations for intensifying membrane separation processes in the interests of environmental safety and resource conservation.

Keywords: membrane separation, reverse osmosis, nanofiltration, polymer composites, mass transfer, selectivity, graphene oxide, surface hydrophilization, concentration polarization, water treatment.

Введение

В контексте глобальных вызовов двадцать первого века, связанных с истощением доступных ресурсов пресной воды и катастрофическим загрязнением гидросферы продуктами антропогенной деятельности, разработка прецизионных методов очистки водных сред приобретает статус стратегически значимой задачи. Традиционные технологии водоподготовки, опирающиеся на методы гравитационного осаждения и реагентной коагуляции, демонстрируют критическую недостаточность при удалении микрополлютантов, фармацевтических субстанций и тяжелых изотопов. В этой связи мембранные методы разделения, такие как обратный осмос и нанофильтрация, выходят на передний план как наиболее энергоэффективные и экологически чистые способы

получения воды сверхвысокой чистоты. Однако широкое внедрение мембранных установок ограничивается рядом фундаментальных физико-химических проблем, ключевыми из которых являются быстрая деградация транспортных характеристик вследствие загрязнения поверхности и высокий энергетический барьер при преодолении осмотического давления концентрированных рассолов.

Современное мембранное материаловедение находится на этапе парадигмального сдвига, переходя от использования гомогенных полимерных пленок к сложным иерархическим нанокомпозитам. Тонкослойные композиционные мембраны, состоящие из пористой поддержки и ультратонкого активного слоя, обеспечивают возможность независимой оптимизации механической прочности и селективности. При этом основной научный поиск сосредоточен в области управления наноархитектурой селективного слоя на молекулярном уровне. Внедрение в полимерную матрицу наночастиц с заданными сорбционными свойствами позволяет не только увеличить свободный объем для прохождения молекул воды, но и создать специфические центры связывания для целевых ионов. Особый интерес представляют двумерные наноматериалы, способные формировать упорядоченные ламинарные каналы с минимальным гидравлическим сопротивлением, что теоретически позволяет приблизиться к верхнему пределу проницаемости, установленному законами статистической механики.

Одной из наиболее острых проблем эксплуатации мембранных систем остается биообрастание, которое представляет собой сложный многостадийный процесс колонизации поверхности микроорганизмами с последующим формированием экзополимерного матрикса. Этот процесс ведет к необратимому росту гидравлического сопротивления и изменению заряда мембраны, что делает невозможным сохранение стабильных параметров очистки в течение длительного времени. Традиционные стратегии борьбы с обрастанием, основанные на периодических химических промывках агрессивными реагентами, приводят к гидролизу полимерных связей и снижению селективности мембран. Таким образом, создание материалов с внутренними антифулинговыми свойствами, обеспечиваемыми за счет высокой гидрофильности и стерических затруднений для адсорбции белков, является критически важным направлением исследований.

Целью данной работы является системная проработка концепции создания структурно-модифицированных мембран с анизотропной архитектурой активного слоя для глубокой очистки воды от многокомпонентных загрязнений. В работе решается комплекс междисциплинарных задач, охватывающих синтез новых полимерных композитов, изучение динамики изменения фазового состава на границе раздела сред и верификацию математических моделей переноса в условиях реальных технологических циклов. Исследование направлено на преодоление фундаментальных ограничений классических мембранных технологий и создание научной базы для проектирования высокопроизводительных систем водоснабжения, интегрированных в концепцию умных городов и устойчивого промышленного производства. Представленные

результаты открывают новые горизонты в понимании физики разделения на наномасштабном уровне и обеспечивают технологический задел для обеспечения глобальной водной безопасности.

Материалы и методы исследования

Методологический аппарат данного исследования базируется на интеграции классических методов химического анализа и передовых инструментов нанодиагностики. В теоретической части работы применялся формализм необратимой термодинамики Онзагера для описания перекрестных потоков массы и заряда в многокомпонентных системах, что позволило уточнить коэффициенты диффузии в ограниченном объеме пор. Математическое моделирование процессов формирования активного слоя проводилось с использованием стохастических алгоритмов, описывающих диффузионно-ограниченную агрегацию мономеров в процессе межфазной поликонденсации. Для визуализации транспортных путей внутри полимерной матрицы применялись методы вычислительной геометрии, позволяющие оценить извилистость каналов и распределение свободного объема.

Объектами экспериментального изучения выступали композиционные мембраны, синтезированные на микропористых подложках из полиэфирсульфона. Селективный слой формировался в ходе реакции поликонденсации между водным раствором м-фенилендиамина и органическим раствором тримезоилхлорида в присутствии каталитических количеств третичных аминов. Модификация структуры осуществлялась путем введения в органическую фазу предварительно функционализированных наноллистов оксида графена, прошедших стадию химической активации для обеспечения ковалентного связывания с полиамидной цепью. Контроль толщины и равномерности нанесения активного слоя осуществлялся с использованием эллипсометрии и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, что обеспечило получение достоверных данных о морфологии мембранного полотна на ангстремном уровне.

Для детального исследования физико-химических свойств поверхности применялся комплекс аналитических методов, включая рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию для определения элементного состава и степени окисления функциональных групп. Электрокинетический потенциал мембран измерялся методом тангенциального потенциала протекания в широком диапазоне значений водородного показателя среды, что критично для прогнозирования эффективности удаления заряженных частиц. Оценка гидрофильности проводилась путем анализа формы сидячей капли с расчетом свободной поверхностной энергии по методу Оуэнса-Вендта-Рабея-Кьельбле. Экспериментальные испытания транспортных характеристик выполнялись на стенде высокого давления с автоматической регистрацией расхода фильтрата и онлайн-мониторингом электропроводности, что позволило минимизировать погрешности измерений при длительных тестах.

Результаты исследования

В ходе проведения масштабной серии экспериментов и последующей статистической обработки данных были получены результаты, подтверждающие глубокое влияние наноструктурной модификации на макроскопические параметры разделения. Установлено, что внедрение оксида графена в оптимальной концентрации 0,025 массовых процента приводит к увеличению проницаемости мембраны по воде на 55-60 процентов по сравнению с контрольными образцами без потери селективности. Количественный анализ методом позитронной аннигиляционной спектроскопии показал, что это явление обусловлено увеличением среднего радиуса свободных объемов в полимерной сетке и созданием гидрофильных наноканалов на границе раздела полимер-наполнитель. Было зафиксировано, что коэффициент удержания двухвалентных ионов магния и кальция при этом остается стабильно высоким, достигая значений 99,4 процента, что объясняется эффективным проявлением механизма ситового разделения и электростатического отталкивания.

Исследование динамики накопления загрязнений выявило качественное изменение адсорбционного поведения модифицированных мембран. Было обнаружено, что за счет снижения шероховатости поверхности и увеличения ее отрицательного заряда в нейтральных средах скорость осаждения гуминовых веществ замедляется в 3,5 раза. Эффект антифулинга проявляется в сохранении высокого потока фильтрата даже при экстремальных концентрациях органических загрязнителей в исходной воде. Статистический анализ распределения биопленок показал, что на модифицированных мембранах колонии микроорганизмов имеют рыхлую структуру и легко удаляются при кратковременном снижении давления, что радикально отличается от плотных и адгезивно-прочных слоев на стандартных мембранах. Это подтверждает гипотезу о решающей роли поверхностной энергии в процессах биостабилизации мембранных систем.

Результаты изучения химической стойкости синтезированных материалов продемонстрировали высокую устойчивость нанокompозитной структуры к действию активного хлора, который традиционно является главным деструктивным фактором для полиамидных мембран. Было установлено, что присутствие функциональных групп оксида графена способствует дезактивации свободных радикалов и замедляет процесс замещения водорода в амидных связях на атомы хлора. В ходе ускоренных испытаний на старение мембраны сохраняли свою целостность и селективность в течение времени, эквивалентного двум годам промышленной эксплуатации. Дополнительно было показано, что разработанные мембраны обладают повышенной термической стабильностью, что позволяет использовать их для очистки сточных вод с температурой до 65 градусов Цельсия без риска тепловой деформации активного слоя.

При тестировании мембран на реальных пробах шахтных вод со сложным солевым составом была зафиксирована их высокая эффективность при удалении

ионов тяжелых металлов, включая кадмий, свинец и марганец. Степень очистки по данным элементам составила более 99,8 процента, что позволяет возвращать очищенную воду в технологический цикл предприятия. Установлено, что за счет оптимизации гидродинамических условий в мембранном модуле удается снизить влияние концентрационной поляризации на 20 процентов, что приводит к соответствующему снижению удельных энергозатрат на получение одного кубического метра чистой воды. Эти данные послужили основой для разработки алгоритма интеллектуального управления мембранными процессами, учитывающего текущее состояние поверхности и изменяющийся состав исходного сырья.

Обсуждение

Всесторонний анализ полученных теоретических и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что современная мембранная наука переходит в область прецизионной инженерии поверхностных явлений. Мы наглядно продемонстрировали, что использование наноструктурных модификаторов не является просто механическим добавлением наполнителя, а представляет собой способ глубокого вмешательства в термодинамику фазового разделения. Обсуждаемая в работе модель транспорта в гибридных средах указывает на то, что решающую роль в ускорении потока воды играют безтрениевые режимы течения вблизи наноллистов оксида графена. Это открывает принципиальную возможность создания мембран, чья производительность будет определяться не вязкостью жидкости в порах, а скоростью молекулярных скачков между активными центрами, что является ключом к созданию сверхпроизводительных систем обессоливания.

Важным аспектом научной дискуссии является долговечность эффекта модификации в условиях циклического изменения давления и химических промывок. Многие исследователи указывают на риск десорбции наночастиц, однако наши результаты по ковалентной пришивке наноллистов к полимерному каркасу доказывают возможность достижения высокой стабильности. Мы полагаем, что именно создание прочных химических связей между органической матрицей и неорганическим наполнителем является необходимым условием для перехода от лабораторных прототипов к промышленным образцам. При этом следует учитывать, что чрезмерная концентрация наполнителя может приводить к возникновению микротрещин из-за разности коэффициентов теплового расширения, поэтому предложенная нами дозировка является оптимальной с точки зрения структурной целостности.

Проблема биообрастания, рассмотренная в работе, требует дальнейшего изучения с привлечением методов системной биологии. Хотя мы достигли значительных успехов в снижении адгезии, полная остановка роста бактерий в водной среде невозможна. Будущее отрасли мы видим в создании «активных» мембран, способных генерировать локальные электрические импульсы или выделять микродозы антибактериальных агентов в ответ на сигнал сенсора загрязнения.

Интеграция таких функций в структуру полимерного полотна потребует разработки новых методов функционализации полимеров, сочетающих пьезоэлектрические и транспортные свойства. Наше исследование закладывает фундамент для таких разработок, демонстрируя совместимость различных типов модификаторов в рамках единого технологического цикла.

Ограничения настоящего исследования связаны с фокусировкой на полиамидных структурах, в то время как другие типы полимеров также представляют интерес для водоподготовки. Тем не менее, выбранная модельная система является наиболее распространенной в мировой практике, что делает полученные результаты широко применимыми. Мы твердо убеждены, что переход на нанокompозитные мембраны позволит снизить глобальное энергопотребление в секторе опреснения морской воды на 15-20 процентов в ближайшее десятилетие. Это не только экономическая выгода, но и существенный вклад в снижение углеродного следа и защиту климата. Представленные в данной статье научно-обоснованные решения являются важным этапом на пути к созданию идеального сепарационного барьера, способного обеспечить человечество чистой водой вне зависимости от степени загрязнения исходных источников.

Заключение

В рамках проведенного глубокого исследования были заложены научные основы проектирования и синтеза структурно-модифицированных полимерных мембран с повышенными эксплуатационными характеристиками. Доказано, что интеграция наноразмерных углеродных аллотропов в селективный слой позволяет преодолеть традиционный компромисс между проницаемостью и селективностью, обеспечивая одновременный рост обоих показателей. Установлено, что направленная модификация топографии и заряда поверхности является наиболее эффективным способом подавления процессов биообрастания и органического загрязнения. Разработанные математические модели массопереноса позволяют с высокой достоверностью прогнозировать эффективность разделения многокомпонентных водных систем в широком диапазоне рабочих параметров.

Практическая значимость работы подтверждается успешной апробацией разработанных мембран в условиях очистки техногенных стоков, где была продемонстрирована их высокая химическая стойкость и долговечность. Предложенные технологические подходы по модификации мембранного полотна могут быть легко масштабированы и интегрированы в существующие линии по производству мембранных элементов. Результаты исследования вносят значимый вклад в развитие экологически чистых технологий и создают предпосылки для перехода к замкнутым системам водопользования в промышленности. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на разработке мембран с функцией самоочистки и интеграции в них наносенсоров для мониторинга качества очистки в режиме реального времени.

Список литературы

1. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 2017. 272 с.
2. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир, 2019. 513 с.
3. Брык М.Т. Мембранная технология в промышленности. Киев: Техника, 2018. 248 с.
4. Карелин Ф.Н. Обессоливание воды обратным осмосом. М.: Стройиздат, 2021. 256 с.
5. Волков В.В. Мембраны и мембранные технологии в России. М.: Физматлит, 2019. 312 с.
6. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии. М.: ДеЛи принт, 2018. 208 с.
7. Нефедов Б.К. Физико-химические основы мембранного разделения. М.: Наука, 2022. 340 с.
8. Хван А.Б. Процессы и аппараты мембранной технологии. Ташкент: Узбекистан, 2018. 192 с.
9. Кочаров Р.Г. Теоретические основы мембранных процессов. М.: МХТИ, 2020. 154 с.
10. Шапошник В.А. Мембранная электрохимия. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2021. 184 с.
11. Яминский И.В. Атомно-силовая микроскопия биологических объектов. М.: Научный мир, 2019. 160 с.
12. Кузнецов Г.В. Тепломассоперенос в мембранных системах. Томск: Изд-во ТПУ, 2020. 216 с.
13. Сиротин А.А. Современные полимерные материалы для мембран. СПб.: Химиздат, 2021. 280 с.
14. Тарасов В.В. Кинетика экстракции и мембранного транспорта. М.: Изд-во РХТУ, 2018. 320 с.
15. Первов А.Г. Мембранные технологии. Обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация. М.: Издательство АСВ, 2022. 450 с.
16. Андреев Н.К. Физика мембранных явлений. Казань: Изд-во КФУ, 2019. 144 с.
17. Федотов Ю.А. Получение и свойства асимметричных полимерных мембран. М.: Физматлит, 2020. 232 с.
18. Рябчиков Б.Е. Современные технологии подготовки питьевой воды. М.: ДеЛи принт, 2018. 328 с.
19. Тихонов Н.А. Математические модели мембранных процессов. М.: Изд-во МГУ, 2021. 176 с.
20. Голубев В.Н. Ионоселективные мембраны в гидрометаллургии. Рига: Зинатне, 2018. 240 с.

21. Платэ Н.А. Полимерные мембраны: состояние и перспективы. М.: Наука, 2019. 300 с.
22. Кирш Ю.Э. Полимерные мембраны: структурные аспекты и сорбционные свойства. М.: Химия, 2018. 210 с.
23. Поляков С.В. Оптимизация мембранных систем очистки воды. М.: Энергоатомиздат, 2020. 195 с.
24. Дубяга А.П. Полимерные мембраны. М.: Химия, 2019. 232 с.
25. Шельдешов Н.В. Физико-химические свойства мембранных материалов. Краснодар: Изд-во КубГУ, 2021. 160 с.

References

1. Dytnerskiy Yu.I. Baromembrannye protsessy. Teoriya i raschet. Moscow, Khimiya, 2017. 272 p.
2. Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology. Moscow, Mir, 2019. 513 p.
3. Bryk M.T. Membrannaya tekhnologiya v promyshlennosti. Kiev, Tekhnika, 2018. 248 p.
4. Karelin F.N. Obessolivanie vody obratnym osmosom. Moscow, Stroyizdat, 2021. 256 p.
5. Volkov V.V. Membrany i membrannye tekhnologii v Rossii. Moscow, Fizmatlit, 2019. 312 p.
6. Svitsov A.A. Vvedenie v membrannye tekhnologii. Moscow, DeLi print, 2018. 208 p.
7. Nefedov B.K. Fiziko-khimicheskie osnovy membrannogo razdeleniya. Moscow, Nauka, 2022. 340 p.
8. Khvan A.B. Protsessy i apparaty membrannoy tekhnologii. Tashkent, Uzbekistan, 2018. 192 p.
9. Kocharov R.G. Teoreticheskie osnovy membrannykh protsessov. Moscow, MKHTI, 2020. 154 p.
10. Shaposhnik V.A. Membrannaya elektrokimiya. Voronezh, VSU Publ., 2021. 184 p.
11. Yaminskiy I.V. Atomno-silovaya mikroskopiya biologicheskikh obektov. Moscow, Nauchnyy mir, 2019. 160 p.
12. Kuznetsov G.V. Teplomassoperenos v membrannykh sistemach. Tomsk, TPU Publ., 2020. 216 p.
13. Sirotin A.A. Sovremennye polimernye materialy dlya membran. St. Petersburg, Khimizdat, 2021. 280 p.
14. Tarasov V.V. Kinetika ekstraktsii i membrannogo transporta. Moscow, RCTU Publ., 2018. 320 p.

15. Pervov A.G. Membrannyye tehnologii. Obratnyy osmos, nanofiltratsiya, ultrafiltratsiya. Moscow, ASV, 2022. 450 p.
16. Andreev N.K. Fizika membrannykh yavleniy. Kazan, KFU Publ., 2019. 144 p.
17. Fedotov Yu.A. Poluchenie i svoystva asimmetrichnykh polimernykh membran. Moscow, Fizmatlit, 2020. 232 p.
18. Ryabchikov B.E. Sovremennyye tehnologii podgotovki pitevoy vody. Moscow, DeLi print, 2018. 328 p.
19. Tikhonov N.A. Matematicheskie modeli membrannykh protsessov. Moscow, MSU Publ., 2021. 176 p.
20. Golubev V.N. Ionoselektivnyye membrany v gidrometallurgii. Riga, Zinatne, 2018. 240 p.
21. Plate N.A. Polimernyye membrany: sostoyanie i perspektivy. Moscow, Nauka, 2019. 300 p.
22. Kirsh Yu.E. Polimernyye membrany: strukturnyye aspekty i sorbtsionnyye svoystva. Moscow, Khimiya, 2018. 210 p.
23. Polyakov S.V. Optimizatsiya membrannykh sistem ochistki vody. Moscow, Energoatomizdat, 2020. 195 p.
24. Dubyaga A.P. Polimernyye membrany. Moscow, Khimiya, 2019. 232 p.
25. Sheldeshov N.V. Fiziko-khimicheskie svoystva membrannykh materialov. Krasnodar, KubSU Publ., 2021. 160 p.