

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 544.72.023.22-048.25

МЕЛЬНИКОВА
Галина Борисовна

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ
МЕМБРАН ПЛЕНКАМИ ЛЕНГМЮРА – БЛОДЖЕТТ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

Минск 2016

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси».

Научный руководитель

Чижик Сергей Антонович, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси

Официальные оппоненты:

Прокопчук Николай Романович, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и переработки полимерных материалов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»;

Рогачев Александр Александрович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Оппонирующая организация

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

Защита состоится «8» декабря 2016 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 4 » ноября 2016 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
доктор физико-математических наук,
доцент

Д.Б. Мигас

ВВЕДЕНИЕ

Модифицирование полимерных мембран в целях улучшения эксплуатационных характеристик является актуальной задачей в современной мембранной технологии. Для этого используются, как правило, химические способы модификации исходных полимерных мембран. Однако наряду с трудоемкостью данные способы не всегда оказываются достаточно эффективными и не позволяют достичь необходимых результатов. Разработка новых методов направленного модифицирования в целях изменения структурных, физико-химических свойств поверхности позволит получать мембраны с улучшенными транспортными характеристиками и увеличенным сроком эксплуатации.

Метод Ленгмюра – Блоджетт позволяет воспроизводимо получать молекулярные моно- и мультислои на основе амфифильных и композиционных высоко- и низкомолекулярных соединений. Возможно нанесение многослойных полиэлектролитных покрытий путем чередования веществ с противоположными зарядами, что обеспечивает более высокую адсорбцию фильтруемого вещества на поверхности модифицированной мембраны, придает ей антибактериальные, термостабильные свойства и устойчивость к действию эмульсий, коллоидного железа, сильных кислот, щелочей и др., а также позволяет повысить степень очистки фильтруемых растворов.

Исследования локальных механических характеристик поверхности исходных мембран и их изменений при нагревании методом атомно-силовой микроскопии позволяют, не разрушая поверхность, охарактеризовать процессы, происходящие на нанометровом уровне.

В связи с вышесказанным изучение особенностей формирования пленок методом Ленгмюра – Блоджетт на поверхности пористых полимерных мембран, а также определение свойств полученных композиционных мембран с антибактериальными свойствами и низкой засоряемостью пор для фильтрации жидкостей представляют важные научные и практические задачи, которые определяют актуальность темы диссертации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190 (п. 12. Междисциплинарные исследования).

Работа выполнена на базе лаборатории нанопроцессов и технологий Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова. Полученные в диссертационной работе результаты связаны с выполнением заданий:

1. Государственной комплексной программы научных исследований «Наноматериалы и нанотехнологии», задание № 1.04 «Разработать теоретические принципы и методики силовой спектроскопии для анализа единичной макромолекулы и провести исследования процессов взаимодействия углеродной нанотрубки с молекулами полимеров, ДНК и биологическими клетками» (№ ГР 20063942 от 24.07.2006), срок выполнения 2006–2008 гг.

2. Государственной комплексной программы научных исследований «Тепловые процессы», задание № 09 «Исследование процессов тепло- и массопереноса на микро- и наноуровне и теплофизических свойств новых материалов, применяемых в теплопередающих устройствах в диапазоне температур 80–400 К» (№ ГР 20073794 от 29.12.2007), срок выполнения 2007–2010 гг.

3. Программы Союзного государства «Нанотехнология – СГ» (№ ГР 20100154 от 16.02.2010, х/д 36/09 от 10.09.2009), задание 4.1.3 «Разработать и создать автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями», срок выполнения 2009–2012 гг.

4. Гранта на выполнение научно-исследовательских работ докторантами и аспирантами НАН Беларуси «Исследование структуры и свойств модифицированных полимерных и керамических мембран методами сканирующей зондовой микроскопии» (утвержден постановлением Бюро Президиума НАН Беларуси от 27.03.2010 № 169 «О выделении грантов на 2010 год»), срок выполнения 2010 г.

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы заключается в создании композиционных мембран путем формирования пленок Ленгмюра – Блоджетт на пористых поверхностях для уменьшения загрязнения мембран в процессе фильтрации жидкостей и придания им антибактериальных свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– провести анализ состояния исследований свойств композитных мембран, методов модифицирования в целях уменьшения загрязнения и улучшения транспортных характеристик, перспектив их применения;

– разработать методики модифицирования поверхности фильтрационных мембран полимерными пленками методом Ленгмюра – Блоджетт;

– выявить влияние модифицирования монослойными и композиционными пленками поверхности полимерных мембран, а также воздействия температур на изменения структуры и локальных механических свойств;

– определить изменения фильтрационных и антимикробных свойств полимерных мембран в результате модификации и оценить перспективы их применения для фильтрации жидкостей.

В качестве объекта исследования были выбраны поверхности плоских ультрафильтрационных полисульфоновых и полиакрилонитриловых мембран, полученных в Институте физико-органической химии НАН Беларуси, трековых мембран из полипропилена и полиэтилентерефталата, пленки Ленгмюра – Блоджетт, их структура и механические свойства.

Научная новизна

1. Разработана методика модифицирования поверхности ультрафильтрационных мембран пленками амфифильных полимеров и блок-сополимеров толщиной от 5 до 10 нм, позволяющая создавать композиционные мембраны с улучшенными структурными и механическими свойствами.

2. Разработана методика получения композиционных мембран, включающая модифицирование полиакрилонитриловой и полисульфоновой мембраны пленкой поливинилпиридина, что привело к возрастанию локальной поверхностной энергии образцов в 2 и 3 раза соответственно, с приданием поверхностям гидрофильных свойств.

3. Установлено, что нанесение на поверхность полисульфоновых мембран монослойной пленки нафiona, обладающей высокой температурой плавления, повышает термостабильность исходных мембран до 120 °С, а поверхность с осажденной композиционной пленкой нафiona, содержащей наночастицы серебра, обладает в отношении тест-культур *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli* бактерицидным действием, а для культуры *Staphylococcus aureus* – бактериостатическим.

4. Показано, что за счет уменьшения сил взаимодействия между фильтруемым веществом и селективным слоем модифицирование двухслойным покрытием поливинилпиридин/полистиролсульфонат натрия позволяет уменьшить загрязнение полиакрилонитриловой мембраны с 54 до 19 % при фильтрации модельного раствора поливинилпирролидона К-30.

Положения, выносимые на защиту

1. Совокупность экспериментальных данных, доказывающих, что модифицирование полиакрилонитриловых и полисульфоновых мембран методом Лен-

гмюра – Блджетт позволяет контролировать структурные, механические и фильтрационные свойства мембран, при этом структура и проницаемость модифицированных поверхностей зависит от типа исходного материала мембраны и пленок Ленгмюра – Блджетт амфифильных полимеров и блок-сополимеров.

2. Модификация поверхности полиакрилонитриловых мембран монослойной пленкой поливинилпиридина оказывает стабилизирующее действие на изменение структуры, диаметра пор, локальных механических свойств поверхности после обработки водой и высушивания в отсутствие импрегнирующих агентов, благодаря фиксирующему обволакиванию поверхности пор, что способствует предотвращению капиллярной контракции.

3. Нанесение на поверхность полисульфоновых и полиакрилонитриловых мембран монослойной пленки нафiona, обладающей высокой температурой плавления, повышает термостабильность исходных мембран до 120 °С, что позволяет использовать их для фильтрации растворов при температурах выше 20 °С.

4. Модифицирование двухслойным покрытием Ленгмюра – Блджетт поливинилпиридин/полистиролсульфонат натрия поверхности полиакрилонитриловой мембраны уменьшает загрязнение исходной мембраны фильтруемым раствором в 2,8 раза, что оценено по результатам ультрафильтрации модельного раствора поливинилпирролидона К-30, за счет придания поверхности умеренно гидрофильных свойств.

5. Полисульфоновые мембраны с осажденной композиционной пленкой нафiona, содержащей наночастицы серебра, обладают бактерицидным действием в отношении тест-культуры *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli* и бактериостатическим действием в отношении культуры *Staphylococcus aureus*, что позволяет использовать их для тонкой фильтрации культуральных, бактериальных и ферментативных сред, инъекционных и инфузионных препаратов.

Личный вклад соискателя ученой степени

Выносимые на защиту результаты работы получены автором лично. Постановка задач, обсуждение полученных результатов анализа топографии поверхности и локальных механических свойств исходных и модифицированных мембран проводились совместно с научным руководителем доктором технических наук, академиком НАН Беларуси С.А. Чижиком. Разработка методик модифицирования поверхностей мембран молекулярно-тонкими и композиционными пленками осуществлялась совместно с кандидатом химических наук Г.К. Жавнерко, изучение и оценка разделительных свойств исходных и модифицированных мембран выполнялась с доктором химических наук, академиком НАН Беларуси А.В. Бильдюкевичем. Программное обеспечение для методики

определения поверхностного угла смачивания разработано А.В. Сергейченко на основании требований, представленных автором диссертационной работы. В совместных с соавторами работах соискатель выполняла экспериментальные исследования, расчеты, принимала участие в обсуждении полученных результатов, формулировании выводов и написании статей, подготовке и презентации докладов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы представлены на Международной конференции «Углеродные наночастицы в конденсированных средах» (Минск, 2006 г.), Международной конференции «Nano-design, technology, computer simulations NDTCS'08» (Минск, 2008 г.), 2-й Международной научно-практической конференции «Приборостроение – 2009» (Минск, 2009 г.), Научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (Гомель, 2009 г.), 8-й Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (Москва, 2009 г.), IX и XI международных конференциях «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии» (Минск, 2010 и 2014 гг.), Международной конференции «Permea 2010» (Словакия, 2010 г.), XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2010» (Москва, 2010 г.), Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ» (Санкт-Петербург, 2010 г.), Международной конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» – НФМ'10 (Санкт-Петербург, 2010 г.), II Международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь – Россия – Украина» (Киев, 2010 г.), Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Нано- и супрамолекулярная химия в сорбционных и ионообменных процессах» (Белгород, 2010 г.), 7th International Symposium “Molecular Mobility and Order in Polymer Systems” (Санкт-Петербург, 2011 г.), XVII Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (РЭМ – 2011) (Черноголовка, 2011 г.).

Опубликование результатов диссертации

По результатам работы опубликованы 22 научные работы общим объемом 1,95 авторского листа, в том числе: 4 статьи в рецензируемых научных журналах (всего 0,4 а. л.), 1 препринт (всего 0,4 а. л.), 1 патент (всего 0,05 а. л.), 5 статей

в сборниках и материалах конференций (всего 0,6 а. л.), 11 докладов и тезисов в сборниках материалов конференций (всего 0,5 а. л.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка (138 наименований) и 4 приложений. Полный объем диссертации 145 страниц, включая 63 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и в общей характеристике работы описана проблематика проводимых исследований, обоснована значимость выбранной темы диссертации, а также определен круг вопросов, требующих проведения экспериментальных исследований.

В **первой главе** рассмотрено влияние структуры и физического состояния полимера на разделительные характеристики мембран. Описаны структурно-морфологические особенности полимерных мембран, используемые методы их оценки и возможность применения метода атомно-силовой микроскопии для изучения структуры и локальных механических свойств поверхности. Приведены основные аспекты влияния адгезионных параметров поверхности на производительные характеристики мембран. Представлены принципы создания и проанализирована возможность использования технологии Ленгмюра – Блоджетт для получения композиционных мембран путем модифицирования поверхности исходных. Кратко изложены методы определения транспортных характеристик. На основании проведенного анализа литературы обоснована актуальность диссертационной работы, определены ее цели и задачи, выбран объект и методики исследований.

Во **второй главе** обоснован выбор полимерных ультрафильтрационных, трековых мембран, используемых для проведения исследования, модельных растворов калибрантов для определения их транспортных характеристик; амфифильных полимеров и блок-сополимеров, применяемых для модифицирования поверхности методом Ленгмюра – Блоджетт.

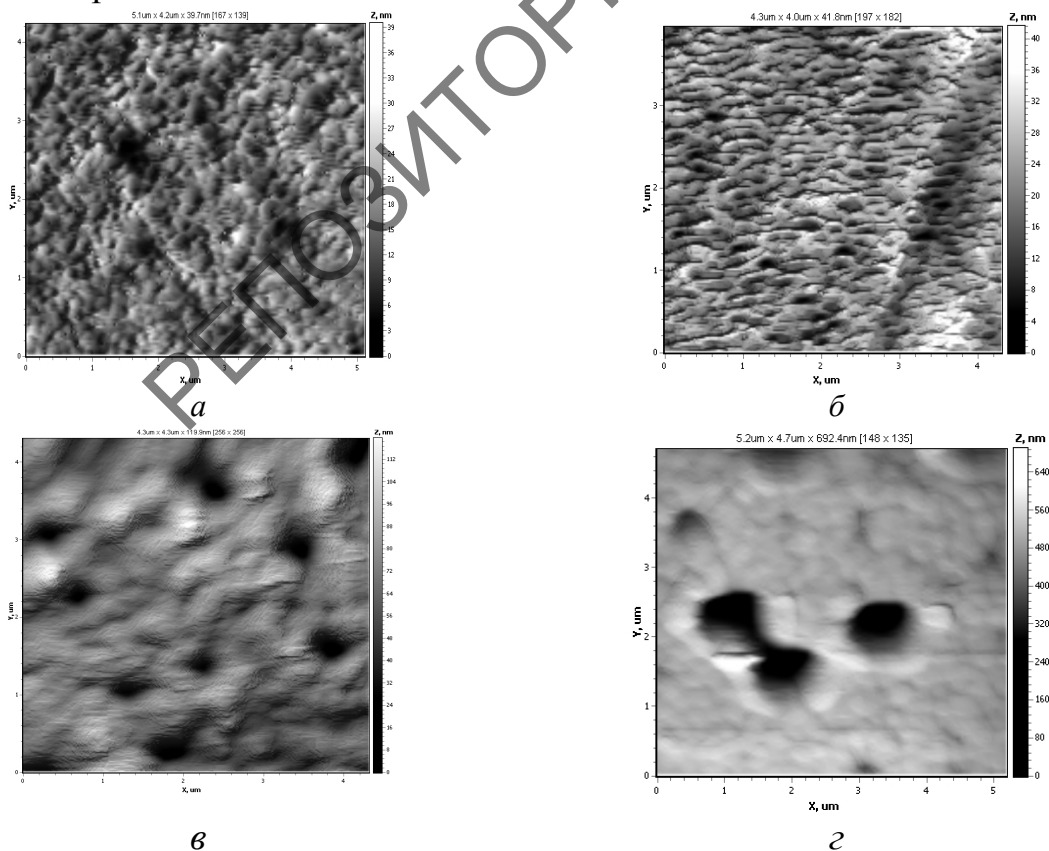
Пленки Ленгмюра – Блоджетт поливинилпиридина, полиметилметакрилата, нафiona, композиционные пленки поливинилпиридина и дипальмитоилфосфотидилхолина на поверхности полимерных мембран формировали при поверхностном давлении 20 мН/м, поливинилкарбазола – при 25 мН/м, латексных частиц – при 35 мН/м (фазовое состояние «твердая пленка»). Давления выделения пленок определяли на основании изотерм «поверхностное давление – площадь на молекулу» при скорости сжатия монослоя 0,4 мм/сек. Концентрации растворов полимеров составляли 1 мг/мл.

Структуру поверхности изучали методом атомно-силовой микроскопии, локальный модуль упругости – методом статической силовой спектроскопии. Определение значений поверхностной энергии осуществляли двумя методами – «неподвижной капли» и статической силовой спектроскопии. Для измерения краевого угла смачивания с точностью $\pm 0,5^\circ$ и расчета свободной поверхностной энергии методом «неподвижной капли» была создана программа SurfaceEnergyMeasuring в среде разработки LabVIEW.

Представлены методики определения антибактериальной активности полученных композиционных мембран.

Третья глава посвящена изучению структурных и локальных механических свойств исходных и модифицированных полимерных мембран. Представлен сравнительный анализ определения поверхностной энергии двумя методами. Оценено влияние воздействия нагрева на локальные механические свойства поверхности исходных и модифицированных мембран методом статической силовой спектроскопии.

Структура поверхности исходных мембран. На основании изображений топографии поверхности (рисунок 1) показано, что для ультрафильтрационных мембран, полученных методом инверсии фаз, характерны поры на поверхности диаметром порядка 100 нм.



а – ультрафильтрационная полиакрилонитриловая мембрана ПАН-100;

б – ультрафильтрационная полисульфоновая мембрана ПС-100;

в – трековая мембрана из полипропилена;

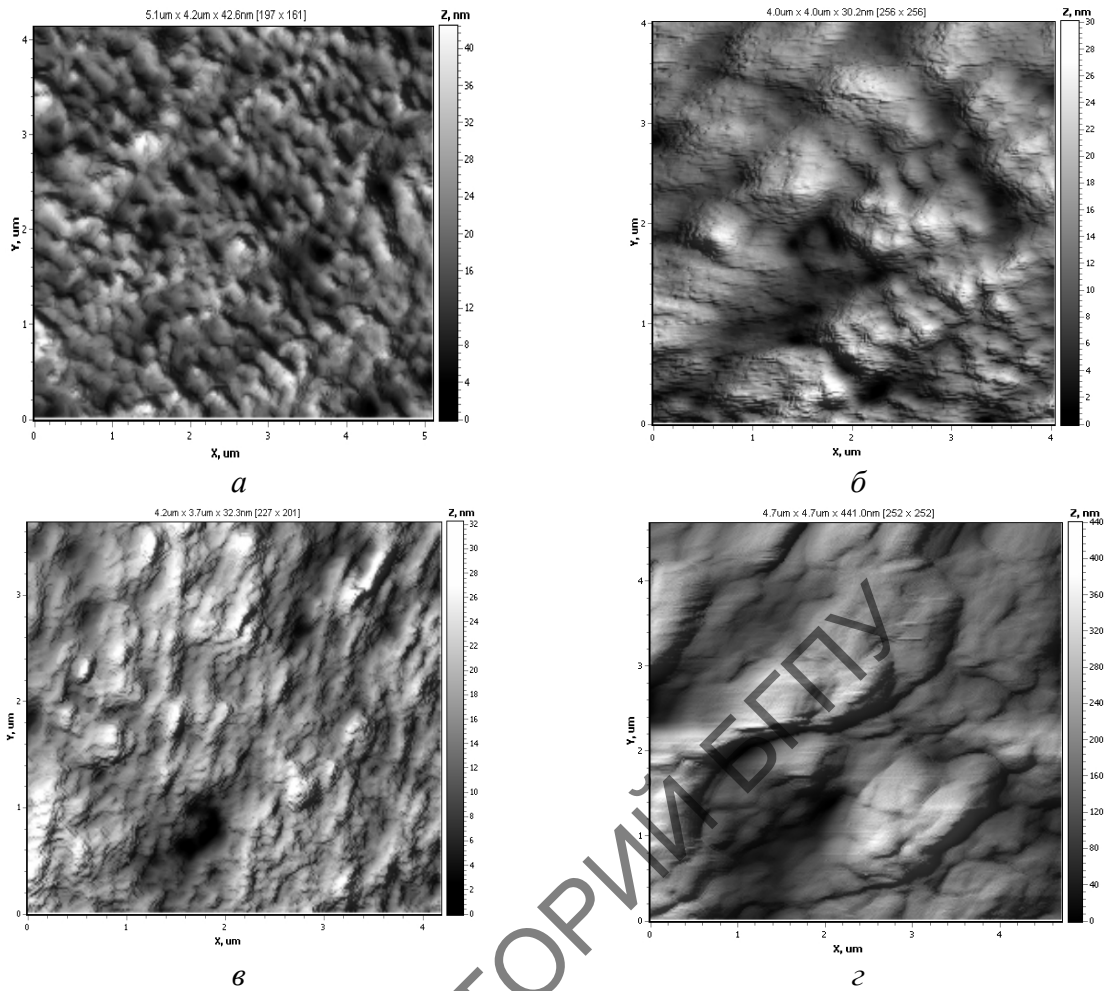
г – трековая мембрана из полиэтилентерефталата

Рисунок 1. – АСМ-изображения (4 x 4 мкм) структуры поверхности мембран

Для трековой полипропиленовой мембраны характерны изолированные поры диаметром 200 нм и плотностью распределения – 1,4 поры / $\mu\text{км}^2$, для полиэтилентерефталевой – 800 нм, плотность распределения – 0,14 пор / $\mu\text{км}^2$. Различаются и значения среднеквадратичной шероховатости (R_q) внепоровой поверхности. Так, для полисульфоновых мембран значения R_q изменяются от 13,8 до 15,6 нм, для полиакрилонитриловых мембран составляют 3,0 нм, т. е. поверхность последних более однородна.

Определение поверхностной энергии. Поверхностная энергия – один из основных параметров контроля гидрофильных свойств поверхности, с помощью которого можно дать первичную оценку загрязнения мембраны в процессе фильтрации. Получено, что для полисульфоновых мембран с большим значением селективности задерживания от 24 до 75 % характерны более высокие значения поверхностной энергии. Методом статической силовой спектроскопии получено возрастание значений поверхностной энергии от $(31,5 \pm 1,6)$ до $(40,5 \pm 2,0)$ мДж/м², такой же тренд выявлен методом «неподвижной капли» – от $(16,9 \pm 1,7)$ до $(31,3 \pm 4,5)$ мДж/м². Диаметр пор, расположенных на поверхности (именно эти поры можно оценить методом сканирующей зондовой микроскопии), для полисульфоновых мембран с различной селективностью 24, 70 и 75 % изменяется от 50 до 150 нм. Для полиакрилонитриловых мембран значения поверхностной энергии составляют 23,9 мДж/м² (определены методом «неподвижной капли»). Метод статической силовой спектроскопии позволяет определить значения поверхностной энергии локально без влияния структурных особенностей материала. Метод «неподвижной капли» дает интегральную оценку с учетом пористости мембраны, что и обуславливает различие в полученных значениях. Таким образом, в результате проведенного исследования продемонстрирована возможность использования двух методов при определении поверхностной энергии.

Структура поверхности модифицированных мембран. Известно, что формирование дополнительного селективного слоя позволяет изменить как структурные, так и транспортные свойства мембраны за счет специфического взаимодействия разделяемых веществ с ее поверхностью. Результаты изучения поверхности модифицированных мембран (рисунок 2) показали, что монослой поливинилпиридина обволакивает исходную поверхность, повторяя морфологию пористой подложки. В результате нанесения слоя латексных частиц (диаметром 50–100 нм) образуется плотная пленка на поверхности исходных мембран. Модифицирование поверхности монослойными пленками не приводит к изменению среднеквадратичной шероховатости поверхности. Для полиакрилонитриловых мембран значения составляют от 3 до 4 нм, для полисульфоновых – от 6 до 6,5 нм.



а – полиакрилонитрил/поливинилпиридин;
б – полисульфон/поливинилпиридин; **в** – полиакрилонитрил/латексные частицы; **г** – полисульфон/латексные частицы

Рисунок 2. – АСМ-изображения (4 x 4 мкм) топографии поверхности модифицированных мембран

Локальные механические свойства мембран. Были определены локальный модуль упругости и значения поверхностной энергии исходных ПС-100 и ПАН-100 мембран, модифицированных латексными частицами и поливинилпиридином (рисунок 3).

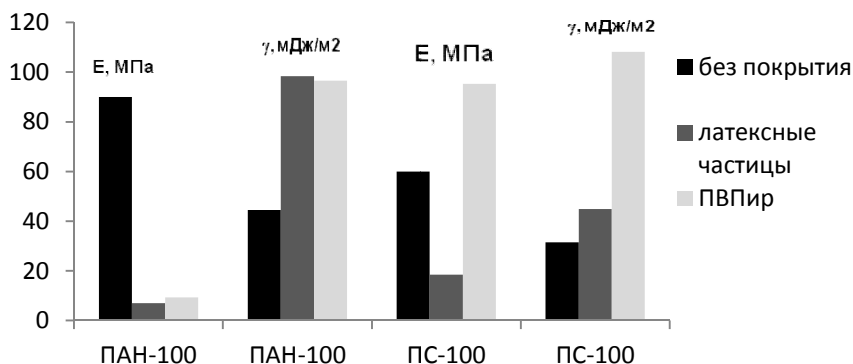


Рисунок 3. – Значения модуля упругости и поверхностной энергии полиакрилонитриловой ПАН-100 и полисульфоновой ПС-100 мембран
 *ПВПир - поливинилпиридин

Установлено, что после модифицирования пленкой поливинилпиридина значения модуля упругости поверхностного слоя для полиакрилонитриловой мембраны уменьшаются в 10 раз, в то время как в случае модифицирования полисульфоновой мембраны наблюдается практически полторакратное возрастание модуля упругости. Покрытие поливинилпиридина, несмотря на его гидрофобные свойства, приводит к значительному увеличению значений поверхностной энергии ультрафильтрационных мембран. Покрытие гидрофобной пленкой поливинилкарбазола не вносит значительных изменений в поверхностную энергию мембран. Увеличения гидрофильных свойств также удалось достичь в случае нанесения на мембраны пленки латексных частиц. Таким образом, модификация мембран пленками Ленгмюра – Блоджетт позволяет создать поверхность с гидрофильными свойствами даже после нанесения одного слоя.

Структура и свойства мембран, модифицированных композиционными пленками. На трековые мембраны были нанесены монослойные пленки поливинилпиридина и композиционные – поливинилпиридин с дипальмитоилфосфотидилхолином. Исследования структуры и модуля упругости позволили установить, что в случае модифицирования мембраны из полиэтилентерефталата монослой поливинилпиридина «натянут» на поры мембраны, на полипропиленовую мембрану пленку осадить не удалось. Модуль упругости модифицированной полиэтилентерефталевой мембраны изменяется (рисунок 4), а полипропиленовой остается неизменным в пределах ошибки эксперимента.

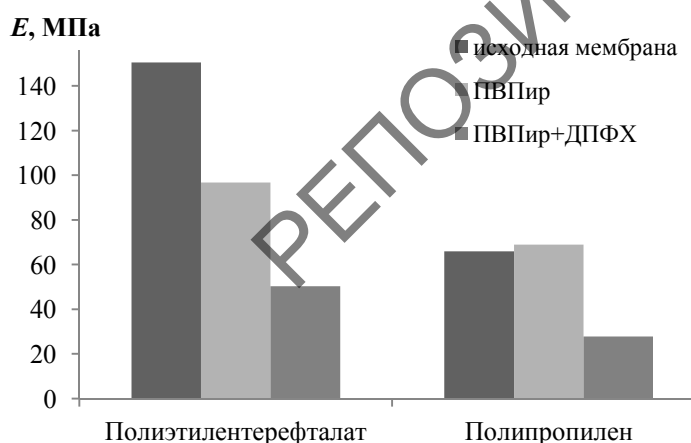


Рисунок 4. – Значения модуля упругости исходных трековых мембран и модифицированных пленками поливинилпиридина и поливинилпиридина с дипальмитоилфосфотидилхолином (ПВПир + ДПФХ)

В результате модифицирования данных мембран композиционной гидрофильной пленкой поливинилпиридина с дипальмитоилфосфотидилхолином значительные изменения структуры установлены для полипропиленовой мембраны, а в случае полиэтилентерефталата наблюдается уменьшение размера пор на поверхности мембраны в два раза. Таким образом, показано, что на полиэтилентерефталевые мембраны можно осадить как гидрофильные, так и гидрофобные покрытия.

В результате модифицирования полисульфоновых мембран пленкой нафиона, содержащей наночастицы серебра, поры и структурные полимерные неоднородности исходных поверхностей закрываются. Об изменении морфологии поверхности можно судить по значению среднеквадратичной шероховатости исходной и модифицированной мембран, которое уменьшается от 13,4 до 5,4 нм соответственно с увеличением содержания наночастиц серебра в полимерной пленке нафиона.

В результате модифицирования нафионом значения поверхностной энергии полисульфоновых мембран изменяются в пределах ошибки эксперимента. Модифицирование пленкой, содержащей различное количество наночастиц серебра, приводит к уменьшению значений поверхностной энергии. Поверхность таких мембран обладает гидрофобными свойствами.

Таким образом, независимо от свойств монослойной пленки методом Ленгмюра – Блоджетт, возможно модифицирование гидрофильных ультрафильтрационных мембран с изменением структуры поверхности, а также их локальных поверхностных свойств.

Стабильность пленок Ленгмюра – Блоджетт в воде. Для оценки стабильности покрытий поливинилпиридина и латексных частиц образцы матриц и мембран выдерживали в дистиллированной воде в течение 60 ч, после чего анализировали. Выдерживание в воде исходных полисульфоновых матриц приводит к изменению структуры и уменьшению размеров структурных элементов в виде углублений на их поверхности, что связано с протеканием капиллярной контракции пор при высушивании образца. При нанесении пленки поливинилпиридина значения модуля упругости уменьшаются, однако после отмывки образцов водой с последующей сушкой значения модуля упругости близки к исходным, что наряду с незначительными изменениями размеров структурных элементов поверхности (на 10 %) свидетельствует о стабилизирующем влиянии пленки поливинилпиридина на усадку при высушивании пористой полисульфоновой подложки, т. е. остатки модифицирующего слоя предотвращают капиллярную контракцию.

Для полисульфоновой матрицы, модифицированной латексными частицами, наблюдалось значительное снижение модуля упругости поверхности поверхностного слоя после выдерживания в воде, что может быть связано с разрушением пленки латексных частиц и образованием сплошного покрытия из адсорбированного полимера (рисунок 5).

Результаты определения значений поверхностной энергии (незначительные изменения по сравнению с исходными образцами) показали, что пленки Ленгмюра – Блоджетт на полисульфоновых матрицах остаются на поверхности полимера и не разрушаются. Таким образом, можно сделать предположение о воз-

возможности применения полученных модифицированных матриц для фильтрации водных растворов.

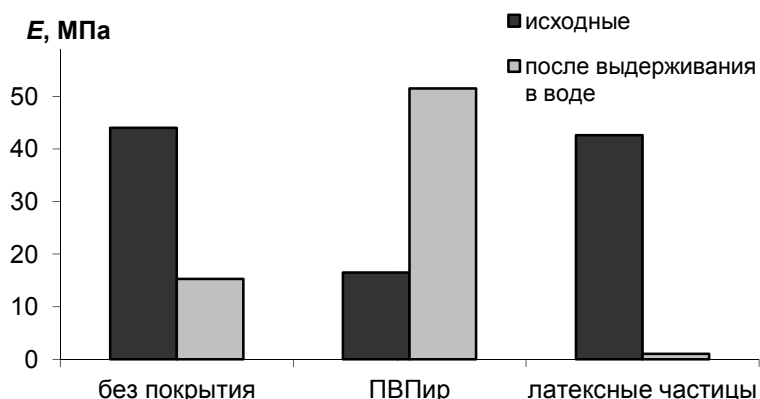


Рисунок 5. – Значения модуля упругости исходной полисульфоновой матрицы и модифицированной поливинилпиридином и латексными частицами до и после выдерживания в воде

Термомеханические свойства исходных и модифицированных мембран. Интересным также представлялось оценить возможность использования модифицированных мембран для фильтрации растворов при температурах выше 20 °С. Воздействию подвергали полисульфоновые, полиакрилонитриловые мембраны и модифицированные поверхности пленкой поливинилпиридина, латексных частиц и нафiona.

Нафion проявил себя как термостабильный полимер и значения модуля упругости не изменялись до 140 °С (предельная температура нагрева термоячейки атомно-силового микроскопа). Для модифицированной мембраны значения данного параметра уменьшались после нагревания свыше 120 °С (рисунок 6).

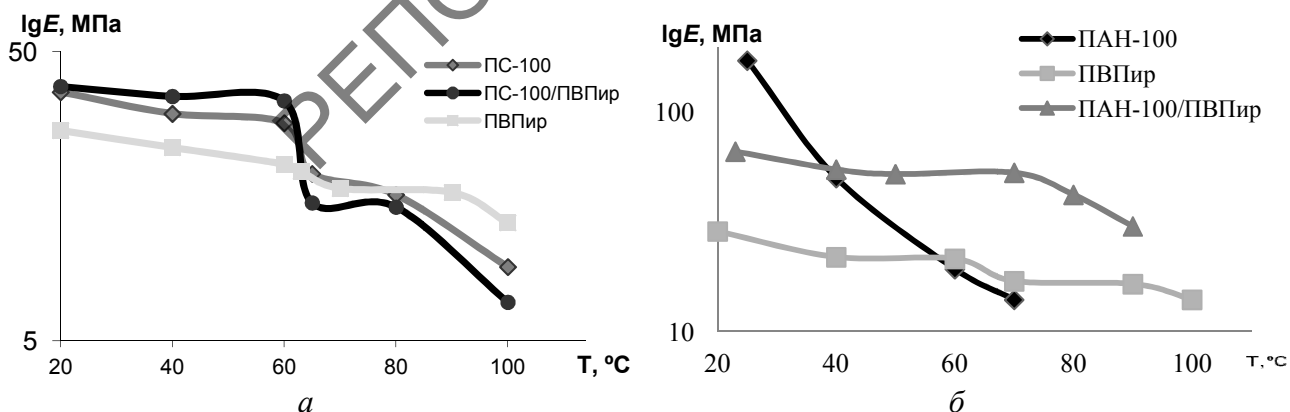


Рисунок 6. – Термомеханические зависимости исходных полисульфоновых ПС-100 (а) и полиакрилонитриловых ПАН-100 мембран (б), модифицированных пленкой поливинилпиридина

Однако эти изменения незначительны, в пределах экспериментальной ошибки, и можно судить только о структурных изменениях, наблюдаемых для данного полимера. Согласно термомеханическим кривым, в результате прило-

женной нагрузки при высоких температурах аморфный полимер претерпевает переход из стеклообразного в вязкотекучее состояние. Для кристаллических полимеров характерно плавное снижение модуля упругости с увеличением температуры. Фазовые переходы для изученных полимеров выявлены при более низких температурах по сравнению с приводимыми в литературе значениями для блочных полимеров. Уже при 60 °С наблюдается фазовый переход полимера из стеклообразного в высокоэластичное состояние. Для полиакрилонитриловой мембраны, модифицированной пленкой латексных частиц, зарегистрировано уменьшение модуля упругости в пределах ошибки эксперимента до температуры 70 °С. Однако модифицирование мембраны поливинилпиридином позволяет повысить термостабильность до 90 °С.

Таким образом, показана возможность стабилизации мембран в условиях фильтрации водных растворов при модифицировании их поверхности путем нанесения пленок методом Ленгмюра – Блоджетт. Наиболее термически стабильной является полисульфоновая мембрана, модифицированная пленкой нафiona. Полученные данные об изменениях структуры поверхности и термостабильности позволяют дать рекомендации о возможности применения мембран для фильтрации растворов при температурах выше 20 °С с избежанием загрязнения фильтруемого раствора веществом, из которого получена мембрана.

В **четвертой главе** представлены результаты анализа транспортных и антибактериальных характеристик ультрафильтрационных мембран.

Разделительные свойства модифицированных мембран. На основании полученных данных исследования структуры и локальных механических свойств мембран для изучения транспортных характеристик наиболее интересными представляются исходные полиакрилонитриловые и полисульфоновые мембраны, модифицированные монослойной пленкой латексных частиц, поливинилпиридина и двухслойной – поливинилпиридин/полистиролсульфонат натрия.

В результате нанесения пленки латексных частиц на полисульфоновою мембрану происходит значительное уменьшение значений производительности (до 10 л/(м²·ч)), что оценено по ультрафильтрации модельного раствора калибранта поливинилпирролидона К-15. Это свидетельствует о практически полном блокировании пористой структуры исследуемых мембран, что подтверждается результатами изучения топографии поверхности, описанной в главе 3. Для модифицированных полиакрилонитриловых мембран характерно как незначительное изменение структуры поверхности, так и уменьшение производительности (на 70 л/(м²·ч)).

Установлено уменьшение удельной производительности полисульфоновых мембран по дистиллированной воде с 250–360 л/(м²·ч) в 2 раза при резком увеличении коэффициента задерживания в результате нанесения слоя поливинилпиридина. Для полиакрилонитриловой мембраны уменьшение

водопроницаемости нехарактерно, однако коэффициент задерживания возрастает с 55 до 60 %. Причиной таких различий является то, что поливинилпиридин не образует сплошного слоя на поверхности полиакрилонитриловой мембраны, а «затягивает» крупные поры. Водопроницаемость при этом не уменьшается за счет гидрофиллизации поверхности.

Дополнительное нанесение на мембраны, модифицированные поливинилпиридином, слоя полистиролсульфоната натрия приводит к уменьшению производительности мембран для воды: в 3 раза для полисульфоновой и в 2 раза для полиакрилонитриловой. Коэффициент задерживания при этом возрастает в 4 и в 1,6 раза соответственно. Положительный результат получен при двухслойном модифицировании полиакрилонитриловых мембран поливинилпиридин/полистиролсульфонатом натрия – установлено значительное снижение степени загрязнения (на 25 % в случае ультраfiltrации модельного раствора калибранта поливинилпирролидона К-15 и на 60 % – поливинилпирролидона К-30) по сравнению с исходной мембраной за счет образования полиэлектролитного комплекса на поверхности мембраны, уменьшающего степень адсорбции фильтруемого вещества к модифицирующей пленке.

При ультраfiltrации модельного раствора калибранта бычьего сывороточного альбумина наблюдались резкое уменьшение значений производительности для полисульфоновых мембран и незначительное увеличение степени загрязнения, двукратное возрастание степени загрязнения для модифицированных полиакрилонитриловых мембран, причиной чего является высокая степень адсорбции фильтруемого вещества к пленке поливинилпиридина.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что основой при проведении модифицирования поверхности мембраны является выбор материала модификатора, так как степень адсорбции фильтруемого вещества зависит от природы полиэлектролита на поверхности мембраны. Однако немаловажную роль играют и структурные характеристики поверхности – размер пор и шероховатость.

Антибактериальная активность поверхности композиционных мембран. Получено, что в отношении культуры *Staphylococcus aureus* характерно бактериостатическое действие мембран. Рост бактерий регистрировали во всех случаях, однако морфотип колоний микроорганизма был изменен. Образцы мембран, модифицированные композиционным покрытием нафiona, содержащим наночастицы серебра, характеризовались бактерицидным действием в отношении тест-культуры *Escherichia coli*. На всех мембранах отсутствует рост бактерии *Pseudomonas aeruginosa*.

В результате выполненной работы установлено, что модифицирование полисульфоновых мембран пленкой Ленгмюра – Блуджетт нафiona позволяет улучшить как разделительные, так и антибактериальные свойства исходных

мембран. Добавление же небольшого количества наночастиц серебра позволяет достичь бактерицидного действия в отношении тест-культуры *Escherichia coli*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Определены условия нанесения амфифильных полимеров и блок-сополимеров на ультрафильтрационные и трековые мембраны (давление выделения от 15 до 35 мН/м, концентрация 1 мг/мл, скорость сжатия монослоя 0,4 мм/с). Независимо от свойств осаждаемого полиэлектролита (гидрофильности или гидрофобности) его можно выделить на пористую поверхность мембраны [2; 3; 7; 13].

2. Формирование пленки Ленгмюра – Блоджетт на поверхности полимерной мембраны происходит путем адсорбции полимера с водной субфазы на поверхность подложки. Показано, что плотная пленка (латексные частицы) блокирует пористую структуру поверхности мембраны. Пленка поливинилпиридина обволакивает исходную поверхность, уменьшая диаметр пор исходных полисульфоновых мембран в 2 раза [4; 8; 15; 16].

3. Показана правомерность использования двух методов – статической силовой спектроскопии и «неподвижной капли» для определения значений поверхностной энергии мембран. Метод «неподвижной капли» дает интегральную оценку значений данного параметра с учетом пористости поверхности. Преимуществом метода статической силовой спектроскопии является возможность использования его при локальной оценке гидрофильных свойств поверхности [1; 5; 6; 9; 10; 12; 22].

4. Показано, что в результате модифицирования полиакрилонитриловой мембраны пленкой поливинилпиридина значения локального модуля упругости уменьшаются в 10 раз: от 90,0 до 9,3 МПа; для полисульфоновой мембраны характерно полуторакратное увеличение по сравнению со значением для исходной мембраны: от 60,2 до 95,3 МПа. Значения локальной поверхностной энергии для этих образцов возрастают в 2 и 3 раза соответственно, что свидетельствует о создании композиционных мембран с гидрофильными свойствами [3; 4; 14; 17].

5. Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что с повышением температуры нагрева до 120 °С локальные механические свойства полимерных мембран, модифицированных пленкой нафiona, не изменяются, что позволяет использовать полученные мембраны для фильтрации водных растворов при температурах выше 20 °С [3; 11; 18].

6. Модифицирование двухслойным покрытием поливинилпиридин / полистиролсульфонат натрия позволило уменьшить загрязнение полиакрилонитриловой мембраны с 54 до 19 % (оценено по результатам ультрафильтрации мо-

дельного раствора калибранта поливинилпирролидона К-30), что обусловлено образованием полиэлектролитного комплекса на поверхности мембраны [4; 21].

7. Мембраны, модифицированные композиционными пленками нафтона, содержащими наночастицы серебра, обладают бактерицидным действием в отношении тест-культуры *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli*. В отношении культуры *Staphylococcus aureus* характерно бактериостатическое действие мембран [2; 19; 20].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР в курсах лекций по дисциплине «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике» для студентов специальностей 1-41 01 03 «Квантовые информационные системы» (Акт о практическом использовании в учебном процессе от 04.05.2016), кафедры «Микро- и нанотехника» приборостроительного факультета БНТУ в лабораторных работах по дисциплине «Техника наноконтроля» (Акт о практическом использовании в учебном процессе от 13.10.2016).

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке конструкций дополнительных модулей, а также программного обеспечения, реализующего работу установки для модифицирования поверхностей различной геометрической формы, что позволяет создавать оборудование для реализации технологии Ленгмюра – Блоджетт с расширенными функциональными возможностями. Полученные композиционные мембраны могут найти применение в молочной и фармацевтической промышленности, а также в организациях, выпускающих ультрафильтрационные мембраны с улучшенными фильтрационными характеристиками (увеличение селективности и уменьшение степени загрязнения).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Мельникова, Г.Б. Определение поверхностной энергии методом силовой спектроскопии / Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик // Тепло- и массоперенос – 2011. – 2011. – С. 330–335.
2. Наноструктурированные мономолекулярные пленки для модификации поверхностей микрофльтрационных мембран / Г.Б. Мельникова, Г. К. Жавнерко, С.А. Чижик, Н.И. Гаврилова // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 61–66.
3. Мельникова, Г.Б. Мономолекулярные пленки для модифицирования поверхности мембран / Г.Б. Мельникова, Г. К. Жавнерко, С.А. Чижик // Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2015. – № 1. – С. 5–9.
4. Structure and mechanical properties of ultrafiltration membranes modified with Langmuir–Blodgett films / G.B. Melnikova, G.K. Zhavnerko, S.A. Chizhik, A.V. Bilydukevich // Petroleum Chemistry. – 2016. – V. 55, Is. 5. – P. 406–412.

Статьи в сборниках трудов и материалов научных конференций

5. Поверхностная энергия материалов, содержащих углеродные наночастицы / Г.Б. Мельникова, Э.М. Шпилевский, Л.И. Сальников, Л.П. Рогинец // Углеродные наночастицы в конденсированных средах : сб. науч. тр. / редкол. : П.А. Витязь [и др.] ; НАН Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. – Минск, 2006. – С. 277–284.
6. Modeling of the process of superhydrophobic surface formation / G.B. Melnikova, A.E. Salamianski, G.K. Zhavnerko, V.E. Agabekov, S.A. Chizhik // 12th International Workshop on Nanodesign Technology and Computer Simulations : Proc. of SPIE / Intern. Soc. for Optical Eng ; ed. : A.I. Melker, V.V. Nelayev. – 2009. – V. 7377. – P. 737716-1–737716-5.
7. Мельникова, Г.Б. Структура и механические свойства пористой основы, модифицированной пленками Ленгмюра – Блоджетт / Г.Б. Мельникова, Г.К. Жавнерко, С.А. Чижик // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии – 2010 : сб. докл. IX Междунар. конф., Минск, 12–15 окт. 2010 г. / редкол. : С.А. Чижик (пред.) [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. – Минск, 2010. – С. 242–247.
8. Мельникова, Г.Б. Современные методы для изучения структуры и свойств поверхности полимерных мембран / Г.Б. Мельникова // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии – 2014 : сб. докл. XI Междунар. конф., Минск, 21–24 окт. 2014 г. / редкол. : С.А. Чижик (пред.) [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. – Минск, 2014. – С. 112–117.

Тезисы докладов на научных конференциях

9. Modeling of the process of superhydrophobic surface formation / A.E. Salamianski, G.B. Melnikova, G.K. Zhavnerko, V.E. Agabekov, S.A. Chizhik // Nano-design, technology, computer simulations NDTCS'08 / BSUIR, 23–27 of June 2008 ; ed. : A.I. Melker, V.V. Nelayev. – Minsk, 2008. – P. 219–222.

10. Сергейченко, А.В. Программное обеспечение для определения свободной поверхностной энергии твердых тел / А.В. Сергейченко, Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик // Приборостроение-2009 : материалы 2-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11–13 нояб. 2009 г. / БНТУ ; редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2009. – С. 225–226.

11. Влияние температуры на структуру и адгезионные свойства мономолекулярных пленок поливинилпиридина / Г.Б. Мельникова, Т.А. Кузнецова, Нгуи-эн Хоанг Иэн, С.А. Чижик // Полимерные композиты и трибология : ПОЛИКОМТРИБ – 2009 : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 18–21 июля 2009 г. / редкол. : В.Н. Адериha [и др.] ; ИММС НАН Беларуси. – Гомель, 2009. – С. 138–139.

12. Сергейченко, А.В. Программное обеспечение для определения свободной поверхностной энергии тонких пленок / А.В. Сергейченко, Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments : сб. тр. 8-й Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 20–21 нояб. 2009 г. / Рос. ун-т дружбы народов. – М., 2009. – С. 274–276.

13. Мельникова, Г.Б. Оценка структуры мембран методами сканирующей микроскопии / Г.Б. Мельникова // ЛОМОНОСОВ – 2010 : материалы XVII Междунар. молодеж. науч. форума, Москва, 12–15 апр. 2010 г. / отв. ред. : И.А. Алешковский [и др.] ; МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2010. – С. 206.

14. Melnikova, G.B. Polymeric Langmuir – Blodgett membranes onto porous matrix: the morphology and properties / G.B. Melnikova, G.K. Zhavnerko, S.A. Chizhik // Permea 2010, Tatranske Matliare, Slovakia, 4–8 Sept. 2010 / Slovakia, 2010. – P. 110.

15. Мельникова, Г.Б. Стабильность мембран, модифицированных пленками Ленгмюра – Блоджетт / Г.Б. Мельникова, Г.К. Жавнерко, С.А. Чижик // Нано- и супрамолекулярная химия в сорбционных и ионообменных процессах : учеб.-метод. материалы Всерос. конф. с элементами науч. шк. для молодежи, Белгород, 14–17 сент. 2010 г. / под ред. А.И. Везенцева ; М-во образования и науки РФ, БелГУ. – Белгород, 2010. – С. 98–101.

16. Мельникова, Г.Б. Структура и вязкоупругие свойства пористой основы, модифицированной пленками Ленгмюра – Блоджетт / Г.Б. Мельникова, Г.К. Жавнерко, С.А. Чижик // Нанотехнологии функциональных материалов

(НФМ'10) : тр. Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 22–24 сент. 2010 г. / Политех. ун-т. – СПб., 2010. – С. 242–244.

17. Мельникова, Г.Б. Оценка физико-химических свойств мембран методами сканирующей зондовой микроскопии / Г.Б. Мельникова, Г.К. Жавнерко, С.А. Чижик // Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь – Россия – Украина : тез. II Междунар. науч. конф., Киев, 19–22 окт. 2010 г. / Ин-т металлофизики им. Г.В. Курдюмова. – Киев, 2010. – С. 129.

18. Мельникова, Г.Б. Влияние температуры на механические свойства пористых полисульфоновых пленок / Г.Б. Мельникова, С.А. Чижик // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 30 нояб. – 2 дек. 2010 г. / СПб., 2010. – С. 583.

19. Мельникова, Г.Б. Исследование свойств поверхности модифицированных микрофльтрационных мембран / Г.Б. Мельникова, Г.К. Жавнерко, С.А. Чижик // XVII Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, Черногоровка, 31 мая – 2 июня 2011 г. / ИПТМ РАН. – Черногоровка, 2011. – С. 97.

20. Nafion monolayer network composites for polymeric ultrafiltration membranes / G.B. Melnikova, G.K. Zhavnerko, S. A. Chizhik, I.A. Gavrilova // Molecular Mobility and Order in Polymer Systems : Book of Abstracts 7th International Symposium St. Petersburg, 6–10 of June 2011 / St. Petersburg, 2011. – P. 87.

Патент на полезную модель

21. Ультрафилтрационная мембрана : пат. Респ. Беларусь, МПК В01D 69/00, В01D 71/42. / Г.Б. Мельникова, Г.К. Жавнерко, С.А. Чижик, А.В. Бильдюкевич ; заявитель Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Нац. акад. наук Беларуси. – № u20150454 ; заявл. 31.12.2015 ; опубл. 30.06.2016 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 3. – С. 119.

Препринт

22. Шпилевский, Э.М. Влияние радиационных воздействий на физико-химические свойства полистирола, модифицированного углеродными наночастицами / Э.М. Шпилевский, Г.Б. Мельникова. – Минск, 2006. – 32 с. – (Препринт № 6).

РЕЗЮМЕ

Мельникова Галина Борисовна

Модифицирование поверхности полимерных мембран пленками Ленгмюра – Блоджетт

Ключевые слова: ультрафильтрационная мембрана, атомно-силовая микроскопия, метод Ленгмюра – Блоджетт.

Цель диссертационной работы: создание композиционных мембран путем формирования пленок Ленгмюра – Блоджетт на пористых поверхностях для уменьшения загрязнения мембран в процессе фильтрации жидкостей и придания им антибактериальных свойств.

Методы исследования: атомно-силовая микроскопия, метод Ленгмюра – Блоджетт, методы фильтрации, оптическая микроскопия.

Полученные результаты и их новизна: разработана методика модифицирования поверхности ультрафильтрационных мембран пленками Ленгмюра – Блоджетт, позволяющая создавать мембраны с улучшенными структурными, механическими и фильтрационными свойствами. Показано, что нанесение пленки нафiona повышает термостабильность исходных полисульфоновых мембран до 120 °С, а поверхность с композиционными пленками нафiona с наночастицами серебра характеризуется бактерицидным действием в отношении тест-культуры *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli*. Впервые модифицирование двухслойным покрытием поливинилпиридин/полистиролсульфонат натрия позволило уменьшить загрязнение ПАН-мембраны с 54 до 19 %, оцененное по результатам ультрафильтрации модельного раствора калибранта поливинилпирролидона К-30.

Степень использования: результаты диссертационной работы внедрены в учебные процессы кафедры микро- и нанoeлектроники БГУИР в курсах лекций по дисциплине «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике» и кафедры «Микро- и нанотехника» приборостроительного факультета БНТУ в лабораторных работах по дисциплине «Техника наноконтроля».

Область применения результатов: тонкая фильтрация культуральных, бактериальных и ферментативных сред, инъекционных и инфузионных препаратов, фильтрация водных растворов при высоких температурах; молочная и фармацевтическая промышленность.

РЭЗІЮМЕ

Мельнікава Галіна Барысаўна

**Мадыфікаванне паверхні палімерных мембран
плёнкамі Лэнгмюра – Бладжэтт**

Ключавыя словы: ультрафільтрацыйная мембрана, атамна-сілавая мікраскапія, поліэлектраліты, метады Лэнгмюра – Бладжэтт.

Мэта работы: стварэнне кампазітных мембран шляхам фарміравання пленак Лэнгмюра – Бладжэтт на порыстых паверхнях для памяншэння засарэння мембран у працэсах фільтрацыі вадкасцяў і надання ім антыбактэрыяльных уласцівасцяў.

Метады даследавання: атамна-сілавая мікраскапія, метады Лэнгмюра – Бладжэтт, метады фільтравання, аптычная мікраскапія.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацавана метадыка мадыфікавання паверхні ўльтрафільтрацыйных мембран пленкамі Лэнгмюра – Бладжэтт, якая дазваляе ствараць мембраны з палепшанымі структурнымі, механічнымі і фільтрацыйнымі ўласцівасцямі. Паказана, што нанясенне плёнке нафіона павялічвае тэрмастабільнасць зыходных полісульфонавых мембран пры нагрэве да 120 °С, а паверхня з кампазіцыйнымі плёнкамі нафіона з наначасціцамі срэбра валодае бактэрыцыдным уздзеяннем ў дачыненні да тэст-культуры *Pseudomonas aeruginosa* і *Escherichia coli*. Упершыню мадыфікаванне двуслойным пакрыццём полівінілпірыдзін / полісіролсульфанат натрыю дазволіла паменшыць забруджванне поліакрыланітрылавай мембраны з 54 да 19 %, ацэненае па вынікам фільтрацыі раствора калібранта полівінілпіралідона К-30.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнай работы ўкаранены ў навучальныя працэсы кафедры мікра- і нанаэлектронікі БДУІР у курсах лекцый па дысцыпліне “Нанатэхналогіі і нанаматэрыялы ў электроніцы” і кафедры “Мікра- і нанатэхніка” прыборабудаўнічага факультэта БНТУ у лабараторных работах па дысцыпліне “Тэхніка нанакантроля”.

Галіна прымянення: тонкае фільтраванне культуральных, бактэрыяльных і ферментатыўных асяроддзяў, ін'екцыйных і інфузійных прэпаратаў, фільтрацыі водных раствораў пры высокіх тэмпературах; малочная і фармацэўтычная прамысловасць.

ABSTRACT

Melnikova Galina

**Surface modification of polymeric membranes
by Langmuir – Blodgett films**

Keywords: ultrafiltration membranes, atomic force microscopy, Langmuir – Blodgett method.

The purpose: creation of composite membranes by forming Langmuir – Blodgett films on porous surfaces to reduce membrane fouling during filtration of liquids and impart them antibacterial properties and.

Methods: atomic force microscopy, Langmuir – Blodgett films, filtration, optical microscopy.

The results and their novelty: a method for modifying the surface of the ultrafiltration membrane by Langmuir – Blodgett films allows to create membranes with improved structural, mechanical and filtration properties. It was shown that modification of polymeric membranes by Nafion films improves thermal stability up to 120 °C. The membranes modified by compositional Nafion films with silver nanoparticles have a bactericidal effect on test culture *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli*. Modification by bi-layer coating polyvinyl/sodium polystyrene sulfonate for the first time allows to reduce fouling from 54 to 19 % of polyacrylonitrile membranes, measured by ultrafiltration of calibrant polyvinylpyrrolidone K-30.

Use category: results of dissertation used in educational process in the department of Micro- and nanoelectronics of BSUIR in the course “Nanotechnologies and nanomaterials in electronics” and in the department of Micro- and nanotechnics of instrument-making faculty of BNTU in the course of laboratory works “Technology and nanocontrol”.

Field of application: fine filtration culture, bacterial and enzymatic environments, injection and infusion preparations, filtration of aqueous solutions at high temperatures; dairy and pharmaceutical industries.

Научное издание

Мельникова Галина Борисовна

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН
ПЛЕНКАМИ ЛЕНГМЮРА – БЛОДЖЕТТ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч.-изд.л. Тираж экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство и государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,

№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

ЛП № 02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ