

Школа **Инженерная школа ядерных технологий**
 Направление подготовки **14.04.02 Ядерные физика и технологии**
 Отделение **ядерно-топливного цикла**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Изучение структурных характеристик и кинетики трековых полимерных и ионообменных мембран для электро-мембранного разделения ионов металлов

УДК 539.2:539.1:661.183.1.081.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОАМ71	Копцев Максим Олегович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	В.В. Сохорева			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Е.В. Латышева	к.фил.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ	Л.И. Дорофеева	к.ф.-м.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженернофизические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

<p align="center">Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p>	<p>При разработке магистерской диссертации должны быть рассмотрены следующие вопросы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Литературный обзор технологий для получения ТМ при облучении альфа-частицами. 2. Определить размеры полученных сквозных пор и исследовать пористость сформированных АСТМ методами растровой электронной спектроскопии. 3. Изучение особенностей разделения ионов металлов с одинаковым зарядом при электро – мембранной через АСТМ с разными диаметрами пор и пористость. фильтрации провести при растворении солей металлов полярных диэлектриков с применения в качестве разделительного устройства ТМ, получить экспериментальные зависимости. 4. Экономическое обоснование проведения НИР 5. Выводы по работе. Заключение.
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>– Презентация.</p>
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Материалы и методы модифицирования	В. В. Сохорева
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Е.В. Латышева
Социальная ответственность	Т. С. Гоголева
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
INTRODACTION MODEL OF CHEMICAL ETCHING TRACK MEMBRANES	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	11.03.2019
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	В.В. Сохорева			11.03.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Копцев Максим Олегович		11.03.2019

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM71	Копцев Максим Олегович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Изотопные технологии и материалы

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет НИИ – 296125 руб. Затраты на з/п – 101333 руб. Материальные затраты НИИ – 4631 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 5,8 руб. за кВт·ч
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Налог во внебюджетные фонды 27,1% Районный коэффициент – 1,3 Накладные расходы – 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ	Сравнение конкурентных технических решений
2. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	1. Иерархическая структура работ; 2. SWOT-анализ; 3. Календарный план-график реализации проекта. Бюджет научно-технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет основной и дополнительной заработной платы исполнителей темы; – отчисления на социальные нужды; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.

Перечень графического материала

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ
5. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Е.В. Латышева	к.фил.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Копцев Максим Олегович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 0AM71	ФИО Копцев Максим Олегович
-----------------	-------------------------------

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистрантура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Изотопные технологии и материалы

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующее излучение, вредные вещества); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – химическая безопасность; – радиационная безопасность; – электробезопасность; – пожарная и взрывная безопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM71	Копцев Максим Олегович		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерные физика и технологии»

Уровень образования высшее

Отделение ядерно-топливного цикла

Период выполнения (весенний семестр 2018/2019 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация <small>(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)</small>
--

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.03.2019	<i>Разработка ТЗ на ВКР</i>	20
14.03.2019	<i>Подбор и изучение материалов по теме исследования</i>	10
17.03.2019	<i>Разработка экспериментов</i>	10
26.03.2019	<i>Постановка и проведение эксперимента</i>	10
7.04.2019	<i>Теоретические и экспериментальные исследования</i>	10
16.04.2019	<i>Постановка и проведение эксперимента</i>	10
1.05.2019	<i>Обработка данных</i>	10
10.05.2019	<i>Обобщение и оценка эффективности полученных результатов</i>	10
01.06.2019	<i>Сдача работы</i>	10

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник	В.В. Сохорева			11.03.2019

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭИ	Л.И. Дорофеева	к.ф.-м.н.		11.03.2019

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа объёмом 103 страницы, 35 рисунков, 24 таблиц, 37 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: трековая мембрана, разделение, циклотрон, латентный трек, химическое травление.

Объектом исследования является изучение возможности электро – мембранного разделения ионов металлов в растворах при фильтрации через трековую полимерную наномембрану

Цель работы – Изучить процессы формирования пористой структуры трековой наномембраны из полиэтилентерефталата и исследовать возможность их применения при электро – мембранном разделении ионов щелочных металлов

В процессе выполнения диссертационной работы проводилось облучение полимера полиэтилентерефталата на циклотроне Р-7М НЛ РВТ, ТПУ, химическое травление полимера, исследование рабочих характеристик сформированных трековых мембран, разработка и создание ячейки для разделения, проведение экспериментов по разделению.

Полученные результаты показывают возможность использования трековых мембран с нанопорами для разделения солей металлов. Показана возможность электро – мембранной очистки ионов растворов солей лютеция от иттербия при одновременной фильтрации.

В результате работы были сформированы трековые мембраны с нанопорами путем облучения полимеров альфа-частицами с энергией 28 МэВ и последующим химическим травлением. Сквозные поры, заданного диаметра создавались химическим травлением. Пористость пор в мембране регулировалась током ускорителя соответственно до $2,3 \cdot 10^{13}$ пор/см². Произведены эксперименты и по электролизу растворов солей щелочных металлов с использованием трековых мембран, получены экспериментальные зависимости изменения ВАХ от диаметра пор.

Обозначения и сокращения

Мембрана — открытая неравновесная система, на границах которой поддерживаются различные составы разделяемой смеси под действием извне полей различной природы.

Трековая мембрана - тонкие полимерные пленки, а также тонкокристаллические слои с калиброванными порами для систем тонкой очистки жидкостей и газов. Пористая система трековых мембран формируется в результате облучения тонких (обычно полимерных) пленок пучком высокоэнергичных тяжелых ионов с последующим травлением треков ионов до образования однородных сквозных пор.

ТМ – трековая мембрана,

АСТМ – асимметричная трековая мембрана

ПЭТ – полиэтилентерефталат

ВАХ – вольтамперная характеристика

${}^4\text{He}$ – Альфа частицы

Асимметричные трековые мембраны – мембраны на трековой основе, обладающие улучшенными транспортными и селективными характеристиками.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	13
1 Литературный обзор	16
1.1 Мембранные технологии	16
1.2 Радиационное воздействие на полимеры и образование латентных треков.....	17
1.3 Обзор методов получения ассиметричных трековых мембран.....	21
1.4 Одностороннее травление облученной пленки.....	21
1.5 Модель химического травления трековых мембран.	23
1.6 Электролиз	25
1.7 Ионообменные мембраны	28
2 Оборудование	30
2.1 Получение треков на полиэтилентерефталатной пленки с использованием циклотрона типа Р-7М	30
2.2 Циклотрон Р-7М НЛ РВТ, ТПУ	30
2.4 Прибор для измерения краевого угла DSA20	32
2.5 Сканирующий электронный микроскоп и атомно-силовой микроскоп ...	32
2.6 Источник питания Б5-49.....	33
3 Экспериментальная часть.....	35
3.1 Облучение ускоренными ионами на циклотроне Р-7М	35
3.2 Расчет пробегов и потерь энергии ионов в ПЭТФ	36
3.3 Расчет поглощенной дозы при облучении альфа-частицами	37
3.4 Сенсбилизация и травление латентных треков в облученных образцов ПЭТФ.....	39
3.5 Исследования характеристики сформированных ТМ	40

3.6 Проведение экспериментов по разделению с использованием экспериментальных образцов.	45
3.7 Исследование возможности Разделение лантаноидов с использованием трековых мембран.	55
3.8 Определение возможности разделения ионов в растворе полярного диэлектрика с использованием ионообменной мембраны.	59
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	60
4.1 Предпроектный анализ	61
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	61
4.1.2 SWOT-анализ.....	62
4.2 Планирование управления научно-техническим проектом.....	67
4.2.1 Иерархическая структура работ проекта.....	67
4.2.2 План проекта.....	68
4.2.3 Бюджет научно-технического исследования	70
4.2.3.1 Расчет материальных затрат НТИ	71
4.2.3.2 Основная заработная плата	73
4.2.3.3 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала	75
4.2.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды	75
4.2.3.6 Накладные расходы.....	76
4.3 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	76
4.4 Реестр рисков проекта	77
5 Социальная ответственность.....	79
5.1 Анализ вредных и опасных факторов, создаваемых объектом исследования	79

5.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных факторов	81
5.2.1 Организационные мероприятия.....	81
5.2.2 Технические мероприятия.....	81
5.2.3 Условия безопасной работы.....	84
5.3 Химическая безопасность	85
5.4 Радиационная безопасность	87
5.5 Электробезопасность	91
5.6 Пожарная и взрывная безопасность	93
ВЫВОДЫ	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	97
Приложение А	101

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные трековые мембраны (ТМ) изготовленные с применением ядерных технологий представляют собой пористый материал толщиной 0-20 мкм с очень гладкой гидрофобной поверхностью. В настоящее время они довольно широко используются в различных областях науки и техники (доочистка питьевой воды, очистка воздуха в особо чистых помещениях, микроэлектроника, медицина и многое другое). Возможность задавать количество пор и контролировать их размеры обеспечили ТМ преимущества перед другими методами, в которых необходимо проводить прецизионную фильтрацию или разделение ионов в растворах.

Применения мембраны в прикладных физических исследованиях, позволяет изучать прохождение электромагнитных волн, используя ТМ как структуру с равномерно заданным количеством и размером пор. Особый интерес могут представлять исследования электро – мембранного разделения ионов солей в растворах с помощью ТМ. Возникающие при этом в стенках пор электрические заряды изменяют массоперенос ионов в растворах.

Также ТМ могут применяться в качестве темплейтных шаблонов при выращивании наноструктур на поверхности различных материалов, а именно: при разработке защитных металлических покрытий, дорогостоящих катализаторов.

Так как поры в трековой мембране распределены определенным образом и имеют неповторяемую трехмерную структуру, которую невозможно создать другими методами, такие ТМ можно применять как защитный знак при производстве дорогостоящих деталей и приборов.

Поры ТМ формируют в пленках полиэтилентерефталата (ПЭТФ), как правило, при облучении тяжелыми ионами с последующим химическим травлением. Существуют определенные ограничения пористости: площадь пор при диаметрах (0,2-0,4) мкм не должна превышать 20% от всей площади мембраны, так как от этого зависит прочность мембраны и возможность её эксплуатации. облучение тяжёлыми ионами позволяет получать пористость пор

не более чем 10^9 пор/см². Для разделения ионов в растворах важным параметром является скорость разделения и поэтому увеличение пористости мембраны является актуальной задачей.

Также актуальны исследования разделения ионов лантаноидов, близких по массе и находящихся в растворах. Так при получении и выделении радионуклида ^{177}Lu остаются следы изотопа ^{176}Yb . Данный изотоп лютеция в настоящее время считается перспективным для радиационной терапии и применяется для диагностики и лечения онкологических заболеваний. Основными способами очистки лютеция являются хроматография и амальгамный метод. Данные методы имеют свои недостатки, в частности не высокая скорость разделения хроматографией и загрязнение ртутью при амальгамном методе. Поэтому мембранный метод разделения может быть перспективным, химически чистым и энергетически мало затратным

Целью данной выпускной квалификационной работы является изучение процессов формирования пористой структуры трековой наномембраны из полиэтилентерефталата и исследование возможности их применения для электро – мембранного разделения ионов различных металлов в растворах полярных диэлектриков.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ и обобщение литературных данных по известным методам формирования сквозных пор.
2. Провести теоретические оценки потерь и пробегов при взаимодействия высокоэнергетических ионов гелия-4 с полимерами.
3. Провести облучение полимерных матриц полиэтилентерефталата высокоэнергетическими альфа-частицами с энергией 28 МэВ, ускоренных на циклотроне Р-7М НЛ РВТ, ТПУ.
4. Разработать методику формирования сквозных пор в полимере, получить экспериментальные зависимости скорости травления сквозных треков от температуры, концентрации раствора и времени травления

5. Получить экспериментальные образцы АСТМ с сквозными порами с пористостью 10^9 - 10^{13} пор/см².

6. Определить размеры полученных сквозных пор и исследовать пористость сформированных АСТМ методами растровой электронной спектроскопии.

7. Изучение особенностей разделения ионов металлов с одинаковым зарядом при электро – мембранной через АСТМ с разными диаметрами пор и пористость. фильтрации провести при растворении солей металлов полярных диэлектриков с применения в качестве разделительного устройства ТМ, получить экспериментальные зависимости.

8. Обобщение полученных результатов исследований и сделать выводы о возможности разделения ионов металлов в растворах электро-мембранным методом с применением АСТМ.

1 Литературный обзор

1.1 Мембранные технологии

Трековые мембраны представляют собой тонкие слои, состоящие из полимерной пленки толщиной от 5 до 25 мкм. Поры в трековых мембранах получаются при облучении исходных непористых материалов высокоэнергетичными частицами. Сквозные поры необходимого диаметра получаются химическим травлением латентных треков [1]. Трековая мембрана имеет значительные преимущества по сравнению с другими пористыми мембранами, из-за их четко определенных структур пор и распределения монодисперсных пор по размерам [2]. Классические ТМ, которые получают в следствии облучения полимерных пленок ускоренными тяжелыми ионами (Ar, Xe, Kr) с последующим химическим травлением латентных треков, имеют широкое применение в процессе разделения, медицине, экологии, биотехнологии и многих других.

Мембраны заняли важное место в химической технологии, многих других, и используются в широком спектре применений [3]. Ключевым свойством является способность мембраны контролировать скорость проникновения химического вещества через мембрану. При контролируемой доставке лекарств целью является умеренная скорость проникновения лекарственного средства из резервуара в организм. В технологии разделения цель состоит в том, чтобы позволить одному компоненту смеси свободно проникать в мембрану, препятствуя проникновению других компонентов.

К 1960 году была разработана современная мембранная наука, но мембраны использовались лишь в нескольких лабораторных и небольших специализированных промышленных применениях. Мембраны страдали от четырех проблем, которые запрещали их широкое использование в качестве процесса разделения: они были слишком ненадежными, слишком медленными, слишком неселективными и слишком дорогими. Решения каждой из этих

проблем были разработаны в течение последних нескольких лет, и процессы разделения мембран в настоящее время являются обычным явлением.

Существующие различные мембранные процессы можно разделить на следующие группы [4]:

Микрофльтрация, Ультрафльтрация, Нанофльтрация, Обратный осмос, Газоразделение, Первапорация, Электродиализ.

Пористые мембраны в основном используются для микрофльтрации и ультрафльтрации. Мембрана содержит поры в диапазоне от 0,1 до 10 мкм для микрофльтрации и от 0,001 до 0,1 мкм для ультрафльтрации. Разделение основано на размере частиц. Для достижения высокой селективности поры на мембране должны быть относительно меньше, чем частицы в смеси. Одним из недостатков использования пористой мембраны является загрязнение мембраны, которое вызывает уменьшение флюса со временем. Химическая и термическая стабильность также являются важными факторами, которые следует учитывать при выборе пористых материалов, поскольку температура и концентрация влияют на селективность и флюс мембраны [5].

Пористые и полимерные мембраны имеют тонкий слой полупроницаемого материала, который используется для разделения растворенного вещества, так как через мембрану действует трансмембранное давление. Степень селективности в значительной степени зависит от заряда и пористости мембраны. Мембраны с симметричными порами более однородны, в то время как асимметричные поры имеют переменный диаметр пор.

1.2 Радиационное воздействие на полимеры и образование латентных треков

Тяжелые заряженные ионы взаимодействуют с веществом, главным образом, через кулоновские силы [6]. При прохождении заряженных ионов через вещество происходят столкновения с атомными ядрами и электронами от атомных орбиталей. При этом они теряют свою энергию. Столкновения тяжелых

заряженных ионов с атомными ядрами, или ядерное взаимодействие, очень редки, так как ядро занимает относительно малый объем в атоме [7]. При низких энергиях ионов (ниже 1 МэВ) доминирует ядерное взаимодействие [8,9]. И наоборот, при энергиях выше 1 МэВ роль электронной составляющей возрастает как \sqrt{E} (где E – энергия иона), достигая максимума в зависимости от иона между энергией 20 и 40 МэВ, а затем с ростом энергии убывает как $1/E$ (рисунок 1) [10].

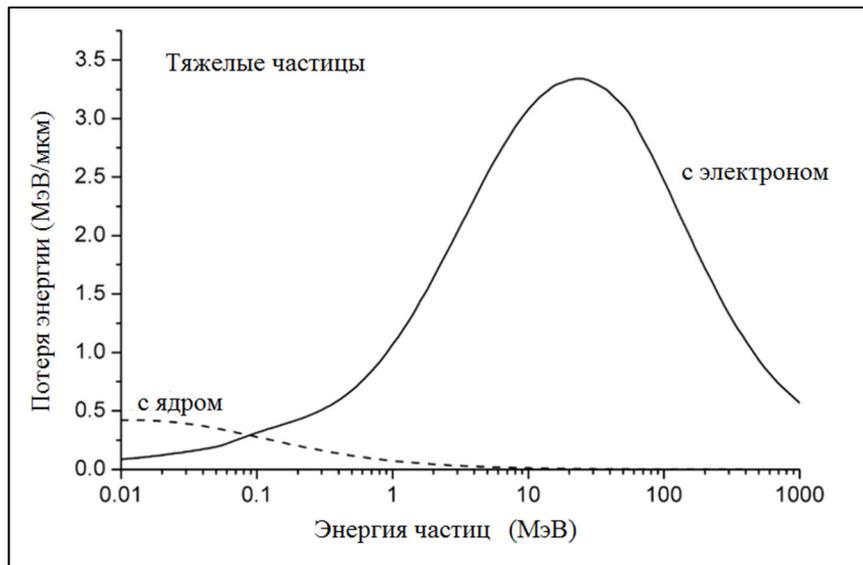


Рисунок 1 – Потеря энергии ионов при ядерном и электронном взаимодействии

Полные потери энергии можно представить в виде

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{полн}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{яд}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{эл}}, \quad (1)$$

Где правая часть выражения представляет собой сумму потерь энергии ядерных и электронных взаимодействий.

Заряженные ионы при электронном взаимодействии передают энергию в основном следующим путем:

1. За счет возбуждения, в этом случае заряженная частица может переносить энергию на атом, поднимая электроны до более высоких энергетических уровней.
2. За счет ионизации. Если заряженная частица обладает достаточной энергией для удаления электрона, может произойти ионизация.

Потери энергии заряженного иона с высокой энергией в веществе при электронном взаимодействии, определяются формулой Бете-Блоха [11]:

$$\frac{dE}{dx} = 0,30711 \cdot \rho \frac{Z_{\text{ядер}} \cdot z}{A \cdot \beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\text{макс}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right], \frac{\text{МэВ} \cdot \text{см}^2}{\text{г}} \quad (2)$$

Где: z – заряд падающей частицы в единицах заряда электрона, ρ – плотность вещества, $Z_{\text{ядер}}$ – заряд ядра, A – атомный вес вещества, $\beta = v/c$ (v – скорость частицы, c – скорость света), m_e – масса электрона, $\gamma = E/M$ – Лоренц фактор частицы, $T_{\text{макс}}$ – максимальная энергия, передаваемая частицей атомному электрону, β^2 – релятивистская поправка, δ – поправка на эффект плотности, I – средний ионизационный потенциал атома среды. В приведенном уравнении член β^2 учитывает случаи рассеяния релятивистской частицы с большими передачами энергии. Легко оценить, что характерное значение логарифма в (2) равно 30. [12]. В области энергии 1-100 МэВ величиной δ можно пренебречь [13].

Для всех ионов потеря энергии уменьшается с увеличением энергии частицы (рисунок 2) [14ц] и в конечном итоге достигает постоянного, не зависящего от энергии значения.

Так как ионы теряют энергию при прохождении в веществе, они в конечном итоге потеряют всю свою кинетическую энергию и остановятся. Тогда полный путь, который заряженный ион проходит до остановки определяет пробег иона R . Из формулы (2) интегрированием получают выражение пробега иона от энергии $R(E)$.

$$R = \int \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \quad (3)$$

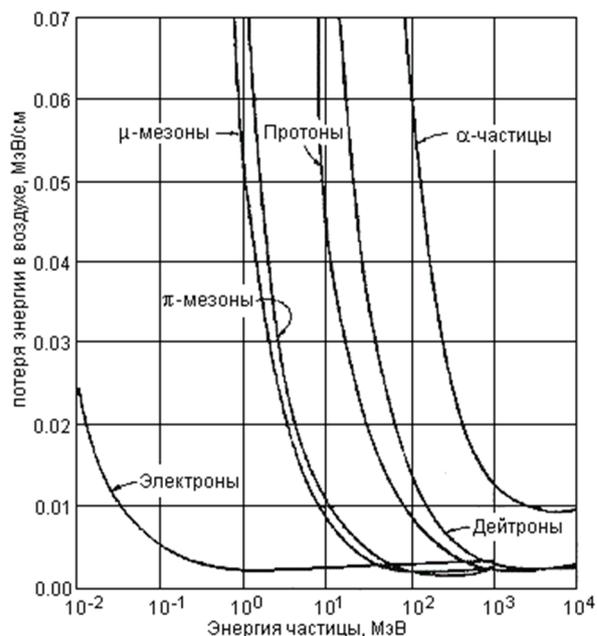


Рисунок 2 – График зависимости потерь энергии в воздухе от энергии частицы для нескольких типов частиц

На рисунке 3 представлены график зависимости dE/dx для некоторых ионов в ПЭТФ полимере и соответствующие данные для пробегов, взятые из [15].

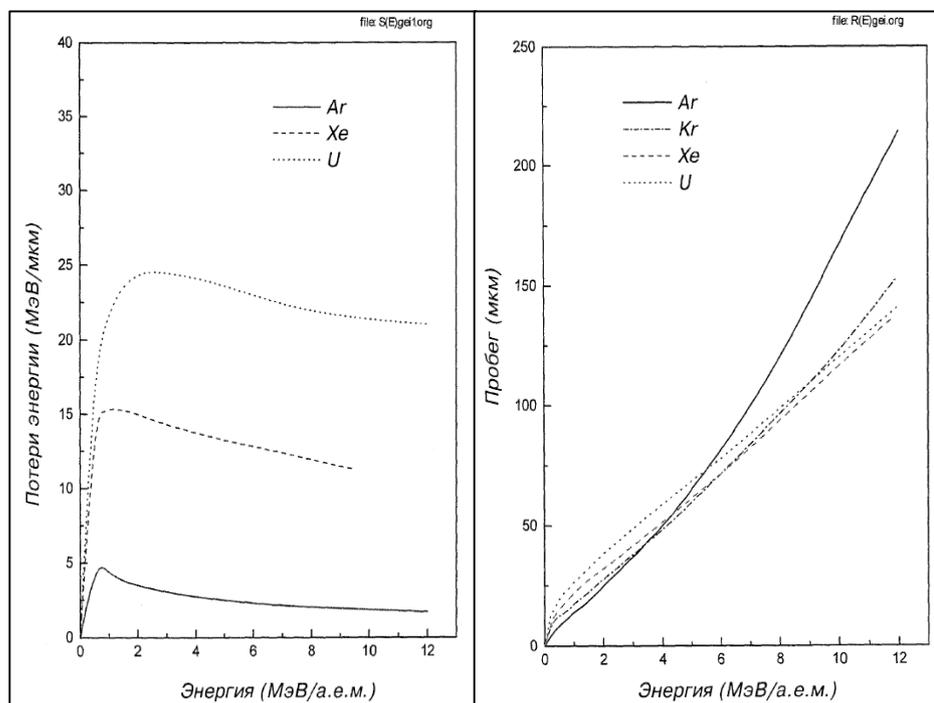


Рисунок 3 – Потери энергии ионов аргона (Ar), ксенона (Xe), урана (U), и пробег ионов аргона (Ar), криптона (Kr), ксенона (Xe), урана (U) в ПЭТФ полимере

1.3 Обзор методов получения ассиметричных трековых мембран

Трековые мембраны со сквозными цилиндрическими порами имеют диапазон диаметров пор 0,05 – 1 мкм. Для проведения ультра и нано–фильтрации необходимы поры меньшего размера. В процессах разделения высокомолекулярных соединений используются мембраны с селективным слоем, у которых поры имеют диаметр в диапазоне 0,5 – 10 нм. Такая мембрана может быть создана на основе трековой мембраны с ассиметричной структурой пор.

Ассиметричные трековые мембраны – мембраны на трековой основе, обладающие улучшенными транспортными и селективными характеристиками. При нанесении на одну из поверхностей трековой мембраны полупроницаемого слоя, мембрана должна приобрести свойства ассиметричной мембраны, так как полупроницаемый слой должен закрыть поры с одной стороны. Селективный слой с порами 10 – 20 нм, нанесенный на поры трековой мембраны 0,2 – 0,4 мкм, позволит осуществить фильтрацию. [16]

1.4 Одностороннее травление облученной пленки

В случае одностороннего травления, облученная высокоэнергетичными ионами пленка располагается в ячейке химического травления так, что с одной из её сторон находился травитель (например, раствор щелочи), а с другой стороны – вода или нейтрализатор травителя (кислота). При использовании одностороннего травления, можно получать ассиметричные поры в самом широком диапазоне соотношений их минимальных и максимальных диаметров. На рисунке. 4 представлены схематичные изображения пор трековых мембран, которые изготавливались данным методом [17].

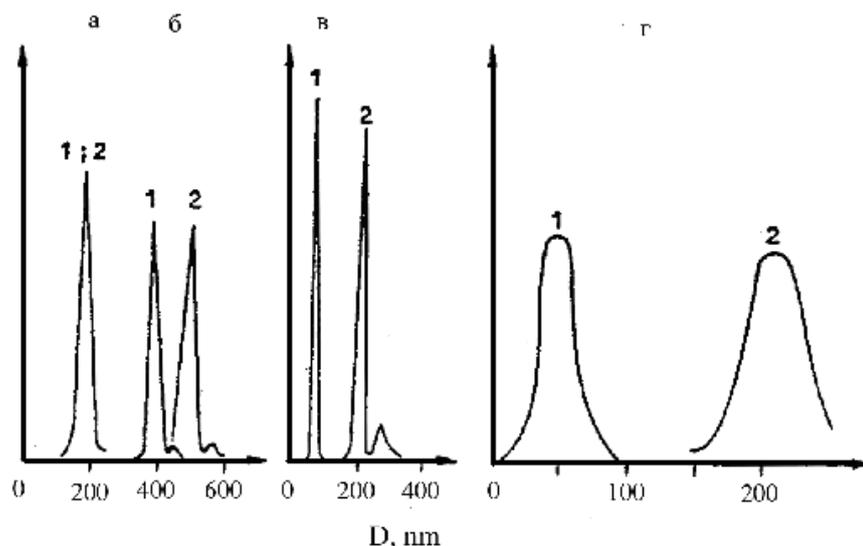


Рисунок 4 – Поры ядерных фильтров с различной величиной анизотропии. Цифрами обозначена сторона мембраны, которой данная кривая соответствует.

Конусность (отношение D_{\max}/D_{\min}): а – 1; б – 1,3; в – 2,2; г – 5

Отношение диаметров пор с разных сторон трековых мембран в этом методе можно варьировать условиями травления (например, добавлением в щелочь спиртов [18], изменением соотношений концентраций травителя и раствора нейтрализатора). Данный метод сложнее реализовать на практике по сравнению с двухсторонним. Одна из причин – это значительное усложнение конструкции травильной ванны, которая должна обеспечить односторонний контакт пленки с травителем [19]. Так же имеется проблема с неоднородностью толщины и структуры пленки. При травлении пленки сквозные поры вскрываются не одновременно, что приводит к появлению большого количества не до конца протравленных пор, а при увеличении времени травления, обеспечивающего вскрытие всех треков, – к большому разбросу диаметров пор [20].

1.5 Модель химического травления трековых мембран.

Пусть в полимерной пленке толщиной L_0 есть сквозные латентные треки, ориентированные перпендикулярно поверхности пленки, ρ - объемная плотность полимера, N - плотность треков, одинаковая (на макроуровне) по всей поверхности образца. Считается, что треки распределены по поверхности пленки случайным образом вследствие стохастического характера облучения и без теневого рисунка от маскирующей сетки или проволочек. Если такой образец поместить в водный или водно-спиртовой раствор щелочи, то происходит быстрое двухстороннее вытравление сердцевины трека (толщиной $\Delta \sim 10$ nm) и его ореола (толщиной $\sigma \sim 100$ nm) [21] со скоростью V_T и медленное, послойное травление поверхностей пленки со скоростью V_B [21]. Травящий раствор диффундирует в образовавшуюся пору, откуда в реакционный сосуд поступают продукты реакции, перемешиваясь с исходным травящим раствором. После того как вместо трека или его части образовалась пора с травящим раствором, на границе раздела фаз полимер-жидкость происходит щелочной гидролиз пористой ПЭТФ пленки. Схема протекания этих реакций в водных и водно-спиртовых растворах щелочи для ПЭТФ представлены в ряде публикаций [23].

Если продолжать процесс травления, последующая эволюция формы пор с вытравленными треками определяется главным образом скоростью травления неповрежденного полимера V_B и событиями, при которых стенки, разделяющие соседние поры протравливаются насквозь, образуя парные и многократные пересечения. Дальнейшее травление приводит к многократным наложениям пор на больших участках мембран, к потере ее прочности и в конце концов к разрушению мембраны [24].

Рассмотрим, как в процессе травления изменяется во времени масса $M(t)$ мембраны площадью S . Если V_B и V_T постоянные величины ($V_T > V_B$), то при двухстороннем (симметричном) травлении пленки с латентными треками в ней образуются поры в виде конусов с осями, направленными вдоль треков или

напоминающие форму песочных часов, когда время травления $t > L_0 / 2V_T$, т.е. когда треки оказываются протравленными по всей толщине пленки L_0 (рис. 1 Б и В). Угол при вершине конуса δ и параметр $\beta = V_T / V_B$ связаны соотношением $\sin \delta = 1/\beta$ [25, 26], очевидным аналогом формулы для вычисления направления распространения фронта ударной волны вдали от сверхзвукового самолета [27].

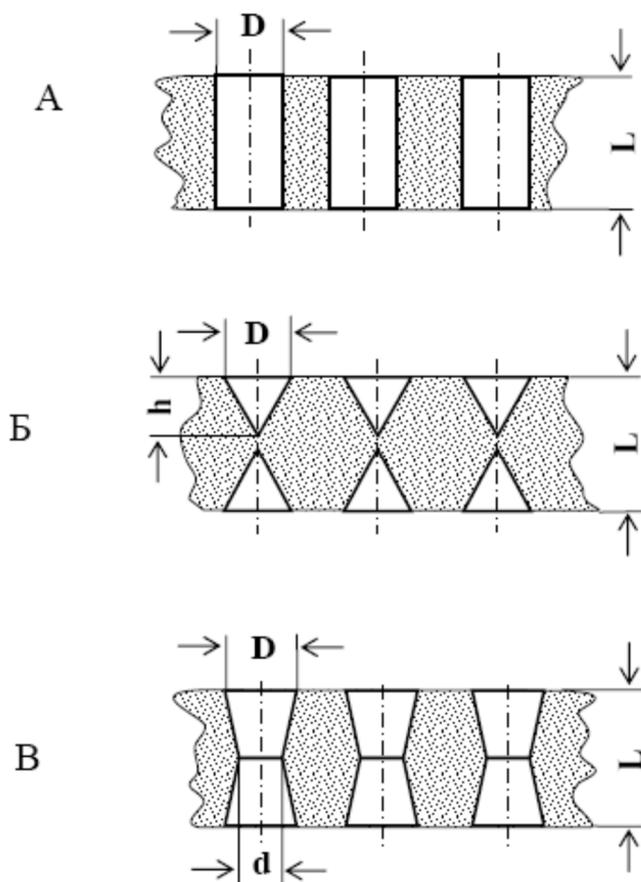


Рисунок 5 – Вид пор в трековых мембранах при нормальном облучении,
 А – цилиндрическая пора, Б – протравленные насквозь («глухие») конические поры, В – сквозные симметричные поры типа «песочные часы».
 Рассчитаем время травления для наиболее характерных цилиндрических пор.

1.6 Электролиз

Электродиализ – это процесс переноса ионов через мембрану под действием электрического поля. Скоростью переноса растворенных ионов можно контролировать изменением напряжения на электродах, а общий поток ионов контролируется изменением силы тока. При процессе переноса с помощью электрического поля может происходить перенос ионов против градиента концентрации. Одна из трудностей данного процесса связана с реакциями на электродах, в процессе которых образуются кислоты и щелочи. Хлориды, образовавшиеся на аноде, образуют хлористые соединения. Среди которых можно выделить газообразный хлор и соляную кислоту. В связи с этим принимаются меры по удалению растворов, содержащих данные вещества. Имеются методики в которых предусматривается возвращение растворов в электролизную ячейку. Раствор может возвращаться в ячейку с контролем рН так и без него. Большинство ранних исследований в области электродиализа проводилось по обессоливанию воды в трехкамерных ячейках. Для данного метода применялись неселективные мембраны. Обессоленный раствор получался в средней камере ячейки. У данной технологии был большой недостаток. Из-за накопления ионов водорода на электродах, в растворе происходило образование кислоты. Долгое время не верили, что эту трудность можно разрешить при помощи ионообменных мембран. Поэтому до начала 1950 г. не было промышленного производства этих мембран. Кроме образования кислоты в камере обессоливания, процесс в трехкамерной ванне с применением неселективных мембран характеризуется низким выходом по току, который равен отношению числа грамм-эквивалентов удаленных солей к количеству прошедшего электричества, выраженному в фарадеях [28].

Раньше в диализе использовались исключительно целлюлозные мембраны. Однако вновь разработанные синтетические мембраны для обратного осмоса и ультрафильтрации также могут использоваться для диализа. Например, амфотерные мембраны для ультрафильтрации могут эффективно использоваться

для отделения макромолекул растворенного вещества из водных растворов, содержащих электролиты. Катионообменные и анионообменные мембраны могут также с успехом использоваться для разделения растворов электролитов и органических веществ с малой молекулярной массой. В зависимости от того какой процесс диализа определяются различные требования к характеристикам ТМ. Однако, можно выделить некоторые общие требования. Мембраны для диализа должны иметь малую толщину и обеспечивать высокую производительность и селективность по целевому компоненту. Эти параметры важны для диализных мембран, т.к. диализ по своей сути – процесс достаточно медленный. Кроме того, толщина мембраны определяет сопротивление массопереносу, т.к. диализ – диффузионный процесс.

В процессе диализа почти всегда имеет место осмотический поток растворителя, который направлен из диффузанта в разделяемый раствор и обусловлен разностью концентраций в диализате и в диффузанте. Высокий положительный осмотический поток, который встречается в виде потока диффузанта, направленного в разделяемый раствор, обычно оказывает нежелательное воздействие. Он снижает концентрацию исходного раствора и поэтому уменьшает полезную движущую силу. В том случае, когда разделяемый раствор является сбросным потоком, его разбавление еще более нежелательно. Поэтому крайне важно выбирать такую мембрану, для которой характерен низкий положительный или отрицательный осмотический перенос. Если диффундирующее вещество находится в ионной форме, то осмотический перенос в некоторой степени может контролироваться выбором мембраны со слабым электрическим зарядом.

Например, при диализе водного раствора каустика через мембрану из поливинилового спирта ион натрия адсорбируется с образованием алкоголята, а мембрана приобретает положительный электрический заряд. Так как подвижность иона гидроксид-иона высока по сравнению с несвязанным ионом натрия, то возникает положительный осмос, поэтому мембрана малоприспособлена для разделения этой смеси. Применение в таком процессе мембраны со слабыми

анионообменными свойствами за счет, например, аминных групп обеспечивает преимущественный отрицательный осмотический поток воды.

Исходный раствор чаще всего называют диализатом, а буферный раствор – диффузатом. Однако нужно иметь в виду, что иногда в литературе буферный раствор называют диализатом.

Предположим, что два разбавленных раствора, обозначенные как 1 и 2, разделены мембраной при постоянной температуре и внешнем давлении.

Первый раствор состоит из двух растворенных веществ. Растворитель обозначим как В. Растворенные вещества обозначим как А и С. Молекулярная масса растворенного вещества А гораздо меньше молекулярной массы другого растворенного вещества С, но имеет почти тот же размер, что и растворитель В. Тогда прохождение через мембрану растворенного вещества С, имеющего большие молекулы, будет незначительным по сравнению с прохождением другого растворенного вещества (А) и растворителя В.

С другой стороны мембраны имеем раствор 2 – диффузат - состоит только из растворителя В и растворенного вещества А. Концентрация растворенного вещества А в растворе 1 больше, чем в растворе 2. Тогда растворенное вещество А будет переноситься из первого раствора во второй, в то время как растворитель будет переноситься обычно в противоположном направлении под действием осмотического давления (положительный осмотический поток).

Рассмотрим случай, когда в растворе присутствует непроницаемое через мембрану высокомолекулярное вещество. Поток растворенного вещества А, диффундирующего в разделяемом растворе при наличии высокомолекулярного непроницаемого вещества, можно записать следующим уравнением:

Влияние концентрации на общий коэффициент проницаемости при диализе водного раствора кислот и гидроксида натрия с использованием мембраны винильного типа иллюстрирует [29].

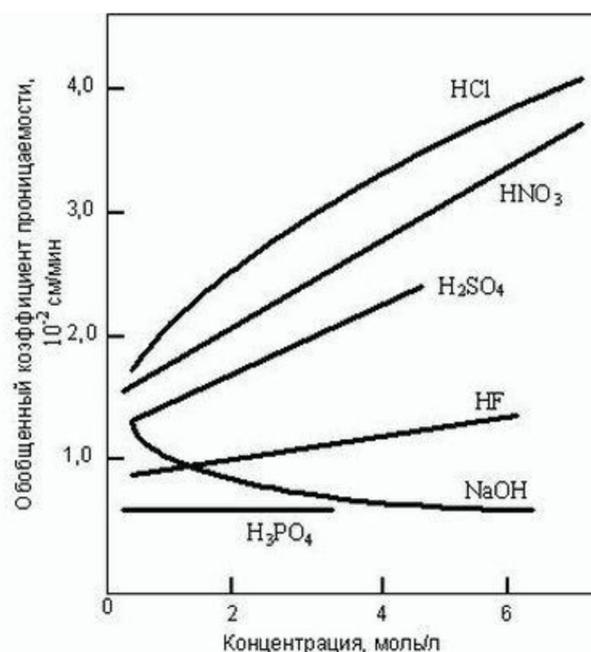


Рисунок 6 – Влияние концентрации на обобщенный коэффициент проницаемости при прохождении кислот и оснований через мембрану.

1.7 Ионообменные мембраны

В 1950 году были синтезированы избирательно проницаемые мембраны для катионов и для анионов были. Такие мембраны вскоре получили применение в электролизе для решения актуальных проблем деминерализации воды. Ионообменные мембраны применяются для концентрации растворов калия.

Существует несколько способов разделения веществ с использованием ионообменных мембран. Один из способов разделения основан на различии электрических подвижностей ионов через катионные или анионные мембраны. Данный метод не позволяет получить высокие коэффициенты разделения при электродиализе с использованием ионообменных мембран. Коэффициент разделения натрия и кальция имеет величину около 1.45. Для увеличения эффективности разделения используется модификация поверхности мембран. Этот подход увеличивает коэффициент разделения, однако недостаточно.

Метод электродиализа основан на проницаемости одного вещества, при этом другое вещество не переносится через мембрану. В этом случае через мембрану, под действием электрического поля, переносятся только ионы

электролитов, в тоже время растворы неэлектролитов не переносятся через мембрану.

Также эффективен метод разделения ионов с противоположным зарядом. Тогда положительный ион мигрирует через катионообменную мембрану, а отрицательно заряженный ион мигрирует через анионообменную мембрану.

В данной диссертационной работе была поставлена задача проверить возможность разделения ионов щелочных металлов, в том числе ионов лутеция и иттербия в растворах электродиализом с АСТМ и ионообменными мембранами [30].

2 Оборудование

2.1 Получение треков на полиэтилентерефталатной пленки с использованием циклотрона типа Р-7М

Для получения трековых мембран была выбрана полимерная пленка полиэтилентерефталат (ПЭТФ) [31,32], толщиной которой составляет 10 – 12 мкм. Пленки облучали ускоренными ионами альфа-частиц с энергией 28 МэВ на циклотроне Р-7М В НЛ РВТ ТПУ г. Томск. Ускоренный пучок ионов альфа-частиц выводился из ускорительной камеры с помощью электростатического дефлектора и через канал, в котором находилась система для равномерной развертки ионного пучка, поступало в специальную камеру облучения. ПЭТФ. Развертка пучка в горизонтальном направлении осуществлялась с использованием схемы электростатической развертки В качестве отклоняющего напряжения применялось синусоидальное напряжение с частотой 300 Гц и амплитудой до 15 кВ. Синусоидальное напряжение с частотой 300 Гц выделялось из гармоник выпрямленного трех фазного напряжения, усиливалось по мощности и через повышающий трансформатор прикладывалась к отклоняющим пластинам. Интервал ускорения соответствовал фазовым углам отклоняющего напряжения от -45 и до $+45$ и от 135 до 225° .

2.2 Циклотрон Р-7М НЛ РВТ, ТПУ

Циклотрон – резонансный циклический ускоритель нерелятивистских тяжёлых заряженных частиц (протонов, ионов), в котором частицы двигаются в постоянном и однородном магнитном поле, а для их ускорения используется высокочастотное электрическое поле неизменной частоты.

Преимущества облучения ионами на циклотроне:

- Стабильность ядер ускоряемых ионов.
- Возможность регулировки энергии бомбардируемых частиц и угла их ввода.

- Возможность регулирования количества латентных треков в облучаемом полимере.

Для формирования латентных треков в полимерах используются различные ионные ускорители. В настоящей работе был выбран ионный ускоритель циклотрон Р-7М НЛ РВТ, ТПУ (рисунок 8 а). Облучение проводилось на выведенном в воздух пучке ионов He^4 , ускоренных на циклотроне Р-7М (рисунок 8 б). На таблице 1 приведены характеристики ускоренных частиц на циклотроне Р-7М.

Таблица 1 – Характеристик иускоренных частиц на циклотрине.

Частицы	$E_{\text{макс}}, \text{МэВ} / I_{\text{макс}}, \text{мкА}$
H	10 / 50
He	28 / 50
C, N, O, Ar	1 МэВ/нукл./ 0,15

а)



б)

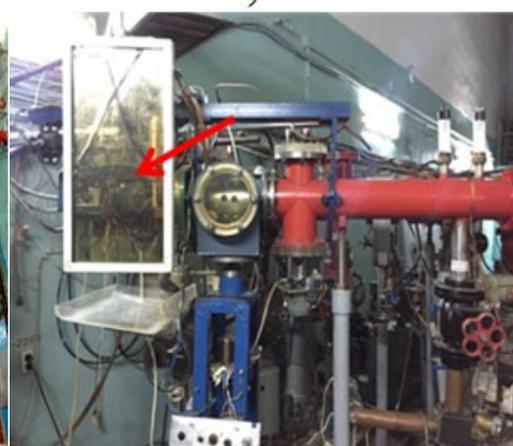


Рисунок 8 а) Циклотрон Р-7М. б) Мишенный узел (место установки облучаемого полимера)

2.4 Прибор для измерения краевого угла DSA20

Анализатор формы капли DSA25 предназначен для определения угла контакта и поверхностного натяжения жидкостей. Комбинация методов измерения позволяет оценить взаимодействие между свойствами твердого вещества и жидкости и, следовательно, проверить качество процессов смачивания и нанесения покрытия.



Рисунок 9 – KRUSS Easy Drop DSA 20.

2.5 Сканирующий электронный микроскоп и атомно-силовой микроскоп

После химического травления в полимерах образуются сквозные поры. Для исследования пористости и морфологии поверхности полимеров ТМ были использованы микроскопические методы.

В нашем исследовании использовались сканирующий электронный микроскоп Hitachi “TM-1000” (рисунок 10) [33] и атомно-силовой микроскоп Интегра-Терма-Прима (NT-MDT) ТПУ. Технические характеристики сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-1000 [34]:

- Ускоряющее напряжение: 15кВ;
- Увеличение: x20-10000;
- Разрешение: 30 нм;
- Глубина резкости: 0,5 мм;
- Детектор: Твердотельный детектор обратнорассеянных электронов;
- Размер области обзора: X=15 мм, Y=18 мм;

- Максимальный размер образца: 70 мм в диаметре, 20 мм в высоту;
 - Режимы: обычный ($5 \cdot 10^{-2}$ Па) или низкого вакуума ($(30-50) \cdot 10^{-2}$ Па)
- для наблюдения образцов с низкой проводимостью или содержащих влагу биологических образцов.



Рисунок 10 – Сканирующий электронный микроскоп Hitachi “TM-1000

2.6 Источник питания Б5-49.

- Выходное напряжение: 0,1-99 В.
- Ток нагрузки: 0,001-0,999 А.
- Потребляемая мощность: 400 Вт
- Масса: 9 кг.

Источник питания постоянного тока представленный на рисунке 11 представляет собой компенсационные стабилизаторы с последовательно включенным регулирующим элементом и усилителем обратной связи. Приборы могут работать как в режиме стабилизации напряжения, так и в режиме стабилизации тока.



Рисунок 11 – Источник питания Б5-49

С целью обеспечения возможности ручного и дистанционного управления выходным напряжением и выходным током в приборах используются два ЦАП, которые обеспечивают преобразование цифровой информации, поступающей либо с передней панели прибора, либо от любого управляющего устройства через разъем ДУ на задней панели прибора, в аналоговую величину сопротивлений, вводимых в измерительные мосты. Переключение сопротивлений осуществляется с помощью электромагнитных реле, которые обеспечивают одновременно и гальванические развязки выходных цепей приборов.

3 Экспериментальная часть

3.1 Облучение ускоренными ионами на циклотроне Р-7М

Исследуемые образцы ПЭТФ подвергались воздействию потоков высокоэнергетичных альфа-частиц с энергией 28 МэВ ускоренных на циклотроне Р-7М НЛ РВТ, ТПУ. Пучок ионов гелия выводился в воздух из ускорительной вакуумной камеры через титановое окно имеющее толщину 40 мкм. После прохождения титанового окна заряженная частица попадает в пространство с воздухом. Далее через воздух (20 мм) попадает на образец ПЭТФ с толщиной ~ (10-12) мкм. Схема облучения образцов приведена на рисунке 12.

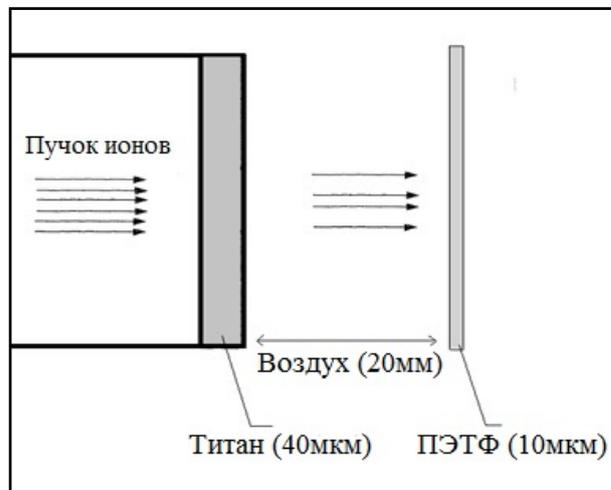


Рисунок 12 – Схема облучения образцов

Исследуемые образцы, диаметром 100 мм помещались в специальный держатель (рисунок 13).



Рисунок 13 – Исследуемый образец ПЭТФ в держателе

Облучение образцов ПЭТФ альфа-частицами проводилось при плотности тока $0,2 \text{ мкА/см}^2$. Время облучения всех исследуемых пленочных образцов ПЭТФ составляет 1,5 минуты. В данной работе проводились исследования на 6 образцах.

После облучения, образцы помещались в герметичный пакет из которого откачивался воздух и выдерживались около 10 часов.

3.2 Расчет пробегов и потерь энергии ионов в ПЭТФ

В данной работе проводились облучения с высокоэнергетическими альфа-частицами. Для того чтобы оценить величину энергии, упавшей на образец и глубину проникновения ионов проводился расчет пробегов и потерь энергии налетающих ионов. Налетающие альфа-частицы должны иметь достаточную энергию для того чтобы проникнуть на всю глубину полимера и создать сквозной латентный трек в полимере ПЭТФ.

При воздействии высокоэнергетических заряженных ионов с веществом происходит в большинстве случаев, электронное взаимодействие. Ядерное взаимодействие считается слишком маленьким. Таким образом, при расчете полных потерях энергии по формуле (1), ядерными потерями можно пренебречь.

В данной работе использовалась компьютерная программа SRIM, которая позволяет рассчитывать величины удельной потери энергии иона в веществе и пробега, а также другие параметры взаимодействия частицы с веществом облучаемой мишени, в том числе дисперсии пробегов, потерь энергии и отклонение траектории иона. Альфа частиц (^4He) в полиэтилентерефталате (ПЭТФ) с помощью программы SRIM. В качестве алгоритма этих двух программ для расчета потерь энергии тяжелых частиц заложена формула Бете-Блоха (2).

Как схема облучения образцов приведена на рисунке 12 пучок альфа-частиц с энергией 28 МэВ подают на титановое окно и когда проходит через титана, они теряют энергии. Далее теряют энергии через воздух и на ПЭТФ пленку подают альфа-частицы 24,5 МэВ. Альфа-частица входит в пленку 10мкм

ПЭТФ с энергией $E=24,5$ МэВ, то величина потерь энергии на пленке ПЭТФ будет $dE/dx= 2,6 \cdot 10^{-1}$ МэВ·см²/(мг).

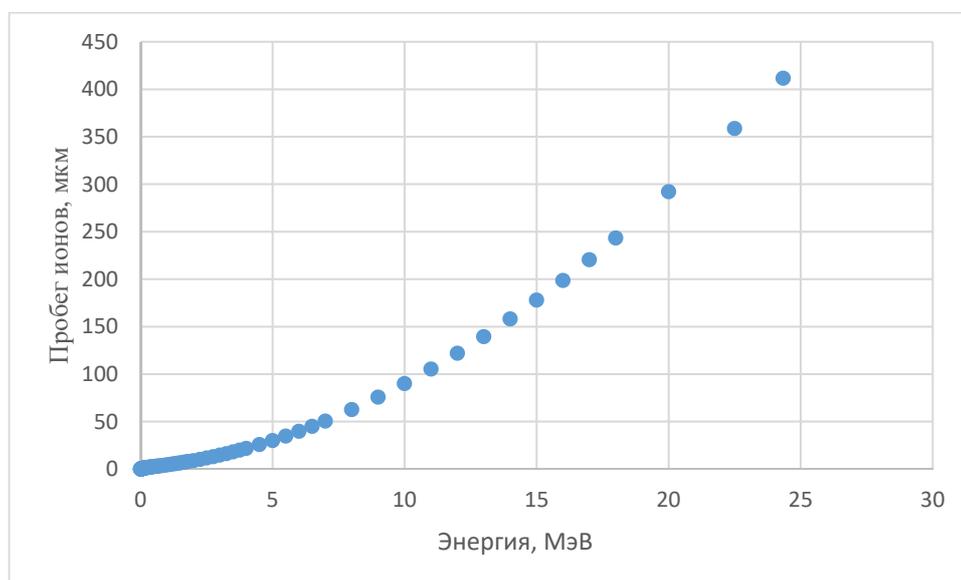


Рисунок 14 – Пробег альфа частиц в ПЭТФ полимере

На рисунке 14 приведены данные программы SRIM для пробегов альфа частиц для полимера ПЭТФ. Пробег альфа-частиц с энергией 28 МэВ равен 490 мкм. Имея данные значения можно сделать вывод, что данная энергия альфа-частицы позволит пройти через систему и пробить насквозь образцы ПЭТФ толщиной в 10 мкм.

3.3 Расчет поглощенной дозы при облучении альфа-частицами

Был проведен расчет поглощенной дозы ионов в облученном полимере. Доза излучения определялась как отношение поглощенной веществом ионизирующей энергии (E) к массе этого вещества (m):

$$D = \frac{E}{m} \tag{12}$$

Следует сказать, что термин «поглощенная доза» универсален и может применяться при воздействии любого излучения на любой материал.

Единицей измерения, принятой в системе СИ для выражения поглощенной дозы, является Грей (Гр), по определению равный джоуль на килограмм (Дж/кг).

Образцы с диаметром ~ 9 см, толщиной ~ 20 мкм облучались альфа-частицами с энергией 28 МэВ при плотности тока $0,2$ мкА/см².

Для расчета поглощенной дозы рассчитывался общий заряд ионов при времени облучения 90 секунд для образца № 1:

$$q_{\text{общ}} = I \cdot t \quad (13)$$

$$q_{\text{общ}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 20 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$$

Заряд альфа-частицы определяется как:

$$q_{\text{альфа}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Число упавших ионов на пленке ПЭТФ при времени 90 секунд на 1 см^2 определяется по следующей формуле:

$$N = \frac{q_{\text{общ}}}{q_{\text{протон}}} \quad (14)$$

Таким образом, число упавших ионов:

$$N = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{3,2 \cdot 10^{-19}} = 1,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}.$$

В нашем случае поглощенная доза (12) определялась по формуле:

$$D = N \cdot \frac{dE}{dx} \quad (15)$$

где N – число упавших частиц на 1 см^2 , dE/dx – удельная потеря энергии.

Удельная потеря энергии для альфа-частиц в данном случае равна $dE/dx = 0,2574 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/(\text{мг})$.

Тогда поглощенная доза на пленке № 1 при времени облучения 90 секунд равна:

$$D = N \cdot \frac{dE}{dx} = 1,25 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^2} \cdot 0,2574 \cdot 1,6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Дж} \cdot \text{см}^2}{\text{кг}} = 2,317 \text{ МГр}$$

3.4 Сенсibilизация и травление латентных треков в облученных образцов ПЭТФ

После облучения исследуемые образцы ПЭТФ в течение некоторого времени хранятся на воздухе, при этом происходит некоторое окисление материала, поэтому дополнительную сенсibilизацию исследуемых образцов проводили, непосредственно, перед химическим травлением, при этом образцы размещались между эритемными лампами с $\lambda=330$ нм и облучались с двух сторон в течении одного часа.

После воздействия УФО облученные пленки подвергались химическому травлению в растворе гидроксида натрия при температуре 75 градусов Цельсия для получения сквозных пор в образцах. Условия и характеристики процессов травления указаны в таблице 4.

После травления пленки ПЭТФ погружали в уксусную кислоту на 10 минут для реакции нейтрализации, для удаления остатков NaOH с поверхности образцов и из пор. На следующем этапе образцы погружали в ванну с дистиллированной водой для нормализации естественной среды. Затем, образцы ПЭТФ высушивались, определялись диаметры пор и использовались в дальнейших исследованиях.

Таблица 4 – Характеристика облученных образцов ПЭТФ при травлении

№	D, МГр	C, моль/дм ³	t, мин	d, мкм
1	2,3	2	7	0,24
2	2,3	2	5	0,16
3	2,3	2	6	0,2
4	2,3	1,5	6	0,09
5	2,3	1,5	4	0,05
6	2,3	1,5	5	0,07

3.5 Исследования характеристики сформированных ТМ

Исследование поверхностной микроструктуры образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi “ТМ-1000”. При исследовании поверхности мембраны методом РЭМ из-за электронного пучка микроскопа происходит зарядка поверхности мембраны и как, следствие, искажение изображения. Для устранения этого артефакта на поверхности исследуемых образцов методом термического испарения в вакууме наносились тонкие слои золота. При микроанализе заряд стекал с исследуемых образцов, и контрастность снимков увеличивалась.

Также были проведены исследования и получены изображения пористой поверхности ТМ с помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT в режиме постоянного сканирования.

Данные о строении поверхности пленок были получены с помощью лазерного сканирующего микроскопа «Olympus Lext Ols 4100».

При проведении исследований на растовом электронном микроскопе мембраны №1 с диаметром пор около 240 нм, приведенного на рисунке 39, можно увидеть разброс по диаметрам пор.

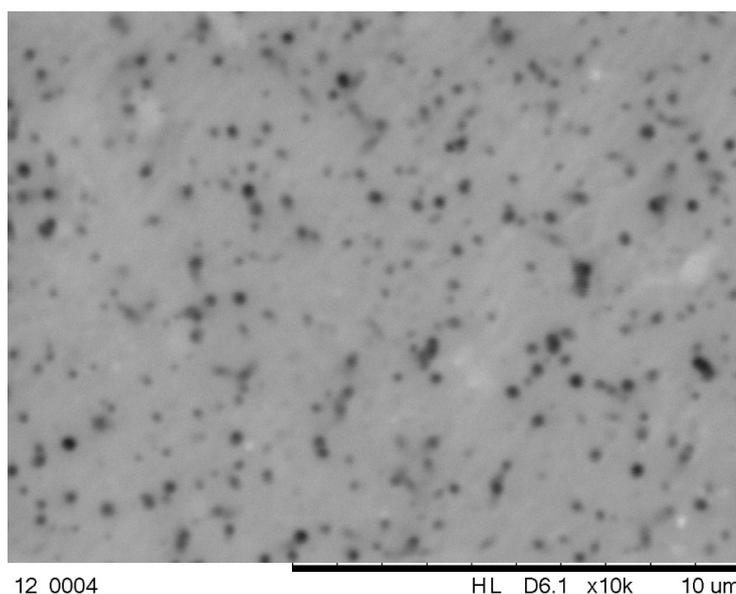


Рисунок 15 – Снимок с электронного микроскопа мембраны №1.

Для данного диаметра пор, плотность пор приемлема. При дальнейшем увеличении плотности пор будет возникать наложение пор, что приведет к неконтролируемому процессу химического травления, а также хрупкости изделия. Для пленок с меньшим диаметром пор возможно увеличение плотности пор.

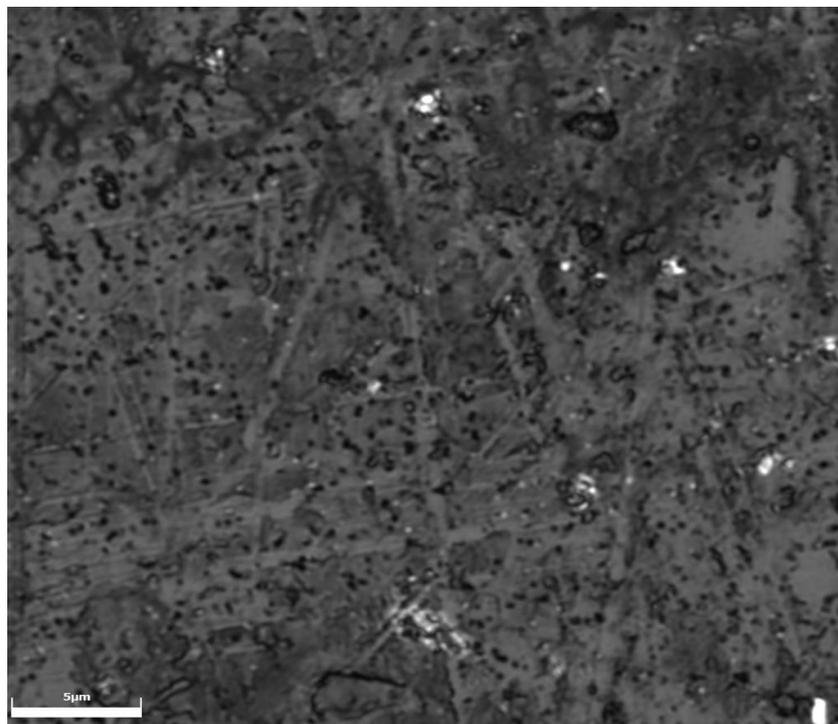


Рисунок 16 – Снимок с конфокального микроскопа мембраны №1.

Так же проводились исследования на атомно силовом микроскопе. На рисунке 38 показана фотография мембраны №5.

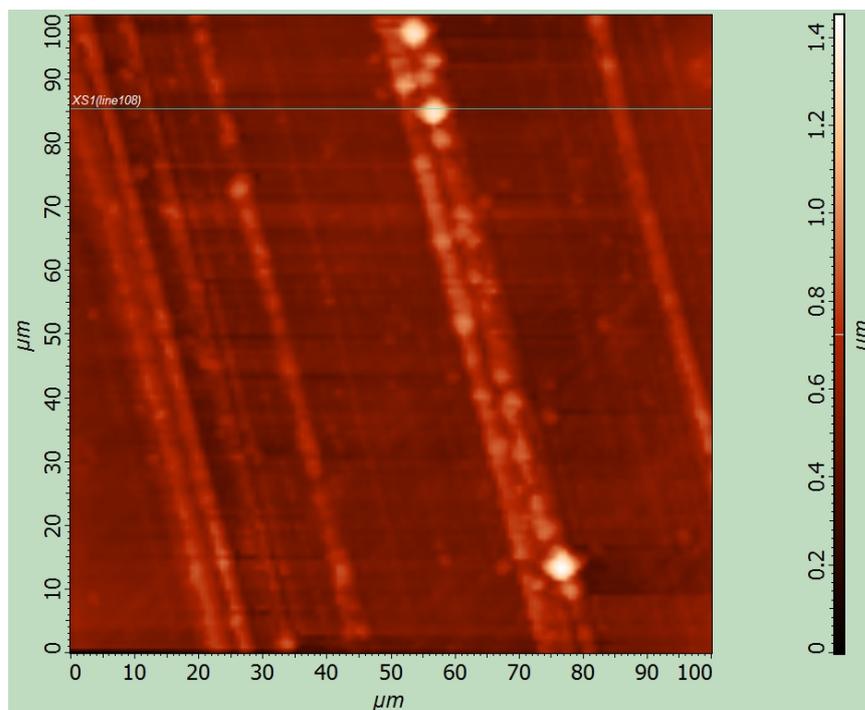


Рисунок 17 – Снимок с атомно-силового микроскопа мембраны №5.

Из снимка можно увидеть, что поры могут достигать размера около 5 нанометров. Также можно увидеть низкую плотность пор.

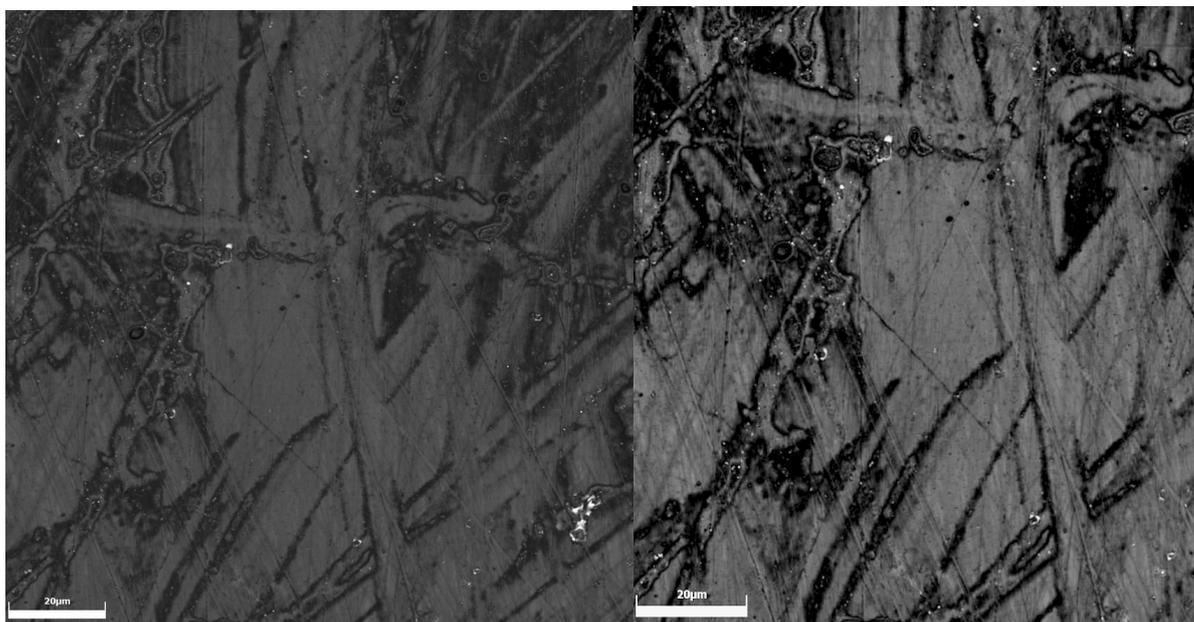


Рисунок 18 – Снимок с конфокального микроскопа мембраны №5.

Низкую плотность пор можно объяснить неравномерной толщиной полимерной пленки. На рисунках 17 и 18 видны дефекты пленки, получившиеся при травлении. Получившиеся дефекты не влияют на разделительные способности мембраны.

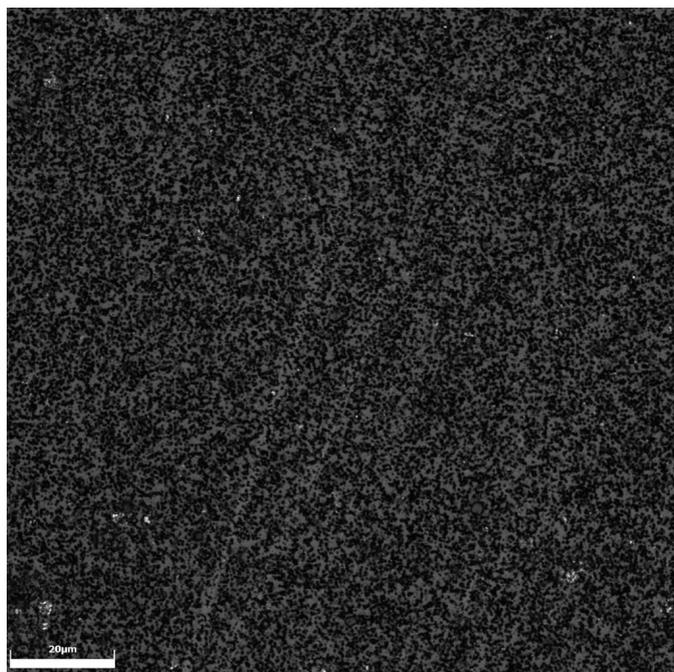


Рисунок 19 – Снимок с конфокального микроскопа мембраны №3

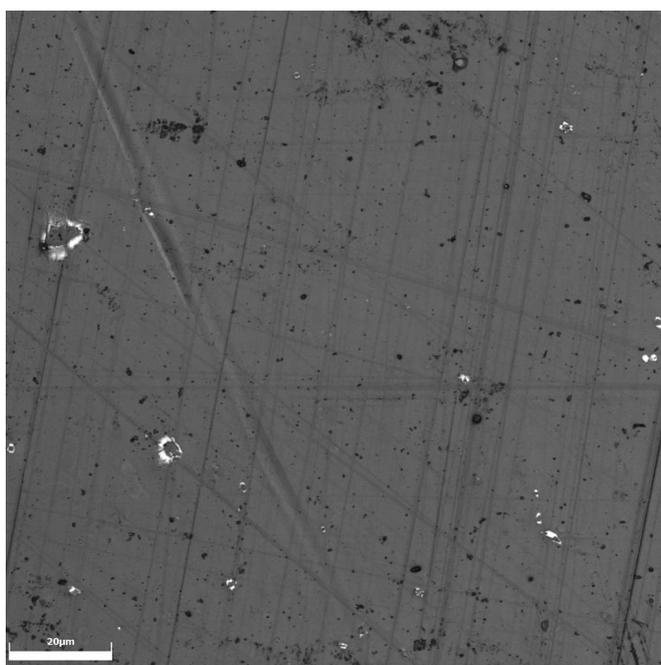


Рисунок 20 – Снимок с конфокального микроскопа мембраны №3
(сторона б)

Из данных рисунков можно увидеть разницу между стороной пленки, которая подвергалась химическому травлению (а) и стороной, изолированной от химического травителя (б).

Для процессов мембранного разделения важным параметром является гидрофильность мембраны. Поэтому в данной работе проводились исследования по определению угла смачивания.

Угол смачивания измерялся методом сидячей капли деионизованной воды при комнатной температуре (25 ± 2) °С, с помощью прибора KRUSS Easy Drop DSA 20.

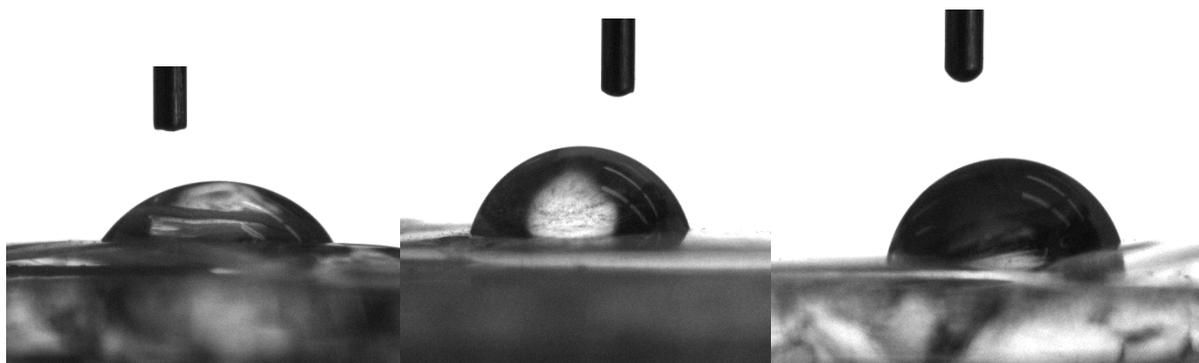


Рисунок 21 – Изображение капель на поверхности мембраны: а) №1 б) №3 в) №5

Углы смачивания для всех образцов приведены в таблице 5.

Таблица 5– Углы смачивания исследуемых образцов.

№	d, мкм	Θ
1	0,24	52,2
2	0,16	34,2
3	0,2	59,8
4	0,09	75,8
5	0,05	75,6
6	0,09	75,8

Все мембраны имеют угол смачивания менее 90°, что говорит о гидрофильности поверхности.

3.6 Проведение экспериментов по разделению с использованием экспериментальных образцов.

Для экспериментов по разделению ионов металлов в растворе полярного диэлектрика электро-мембранным методом была разработана и изготовлена разделительная ячейка. Установка по разделению включала в себя ёмкость, разделённую мембраной и источник постоянного напряжения.

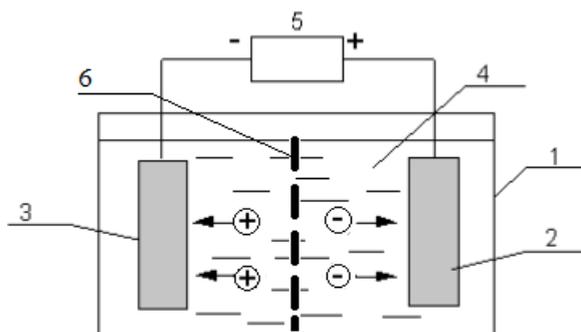


Рисунок 22 – Схема электродной ячейки:

- 1 – корпус; 2 – анод; 3 – катод; 4 – межэлектродное пространство;
5 – источник постоянного тока; 6 – трековая мембрана

В ёмкость, подключённую к аноду заливался раствор солей, в ёмкость с катодом дистиллированная вода. При подаче напряжения происходило движение ионов, отрицательно заряженные ионы двигались в сторону анода, а положительно заряженные ионы двигались к катоду преодолевая мембрану. При разделении снимались показания вольт-амперной характеристики в начале и конце эксперимента. При пропускании тока положительные ионы, проходящие через мембрану, стремясь к катоду, образуют гидроксиды, а отрицательные ионы хлора стремятся к аноду и образуют газообразный хлор и соляную кислоту. После проведения эксперимента проводилось определение концентрации щелочи образовавшегося на катоде и последующее сравнение концентраций получившихся растворов. Поскольку первоначальные молярные концентрации солей в растворах равны, можно оценить возможность разделения. В эксперименте использовано 6 мембран с разными диаметрами пор. Характеристики мембран указаны выше в таблице 4.

Мембрана №1 имеет поры диаметром 0,24 мкм. Исследования проводились в течении 15 минут для каждого раствора. Начальная концентрация раствора соли равна 0,219 моль/дм³

На рисунке 23 показаны Вольт–Амперные характеристики для мембраны в растворах солей NaCl и KCl.

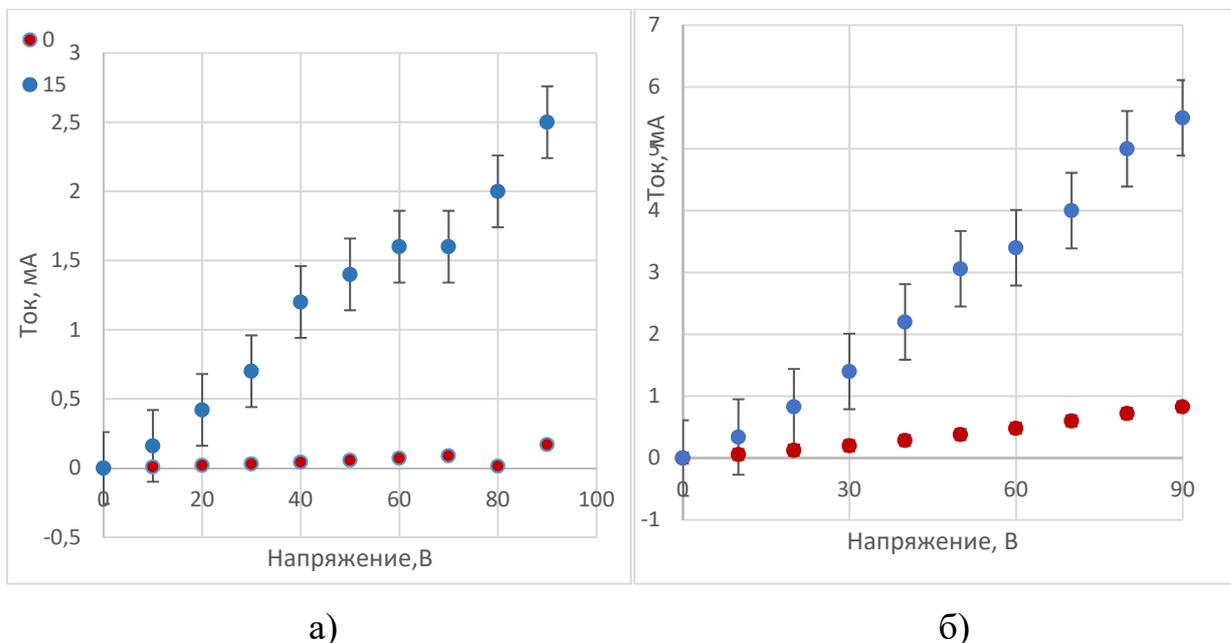
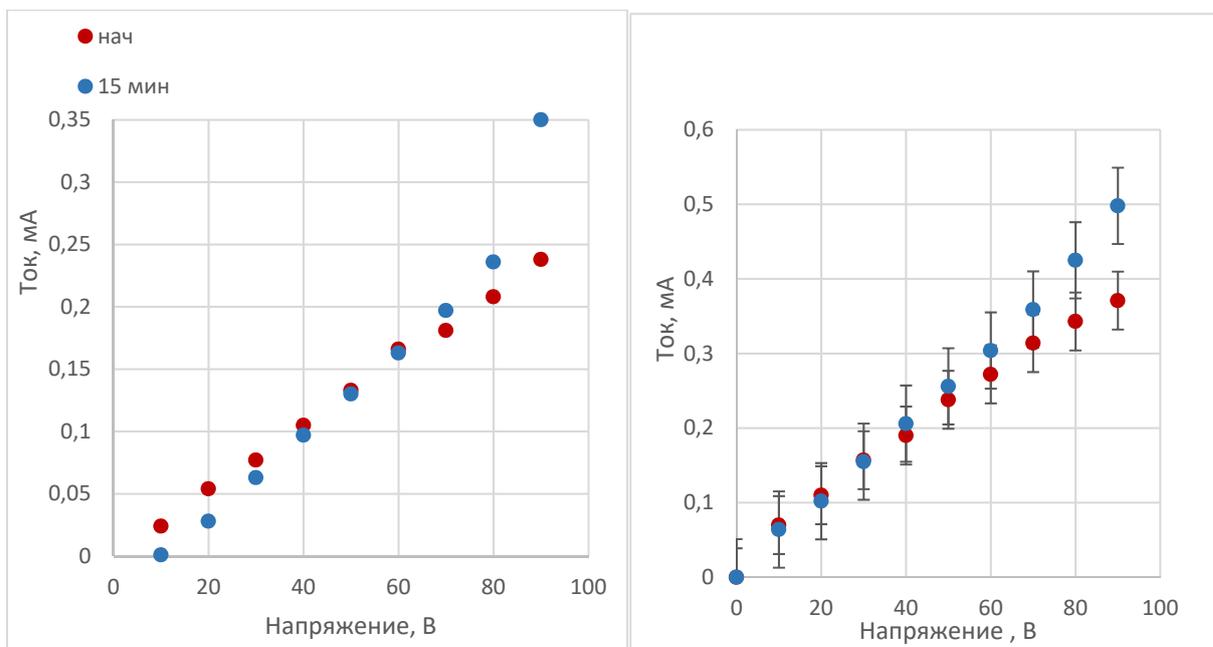


Рисунок 23 – Вольт – Амперные характеристики мембраны №1 в растворах NaCl(а) и KCl(б)

Анализ ВАХ показывает, что ток для ионов натрия и калия со временем увеличивается. Однако, ток для данных растворов имеет разные значения что, вероятно, связано с разной скоростью переноса и электрохимическим эквивалентом.



а)

б)

Рисунок 24 – Вольт – Амперные характеристики мембраны №1 в растворах CaCl₂(а) и MgCl₂(б)

Из графиков видно, что ток для раствора солей CaCl₂ и MgCl₂ со временем увеличивается не так сильно по сравнению с растворами NaCl и KCl. Возможно это связано с торможением ионов при прохождении через мембрану. В таблице 6 приведены значения концентрации растворов после фильтрацию через мембрану №1.

Таблица 6 – Таблица концентраций растворов после фильтрации через мембраны №1

	С ,моль/дм ³
Na	$6,738 \cdot 10^{-4}$
K	$4 \cdot 10^{-3}$
Mg	$2.465 \cdot 10^{-4}$
Ca	$1.655 \cdot 10^{-4}$

Зная начальную концентрацию солей и концентрации щелочей можно определить степень извлечения и коэффициент разделения.

Коэффициент извлечения для натрия:

$$R_{Na} = \frac{C_k}{C_{нач}} = \frac{6,738 \cdot 10^{-4}}{0,01} = 0.067, \quad (16)$$

Где C_k – концентрация щелочи на катоде, $C_{нач}$ – начальная концентрация соли.

Аналогичный расчет приводим и для других исследуемых веществ:

$$R_K = 0.4;$$

$$R_{Mg} = 0.025;$$

$$R_{Ca} = 0.017.$$

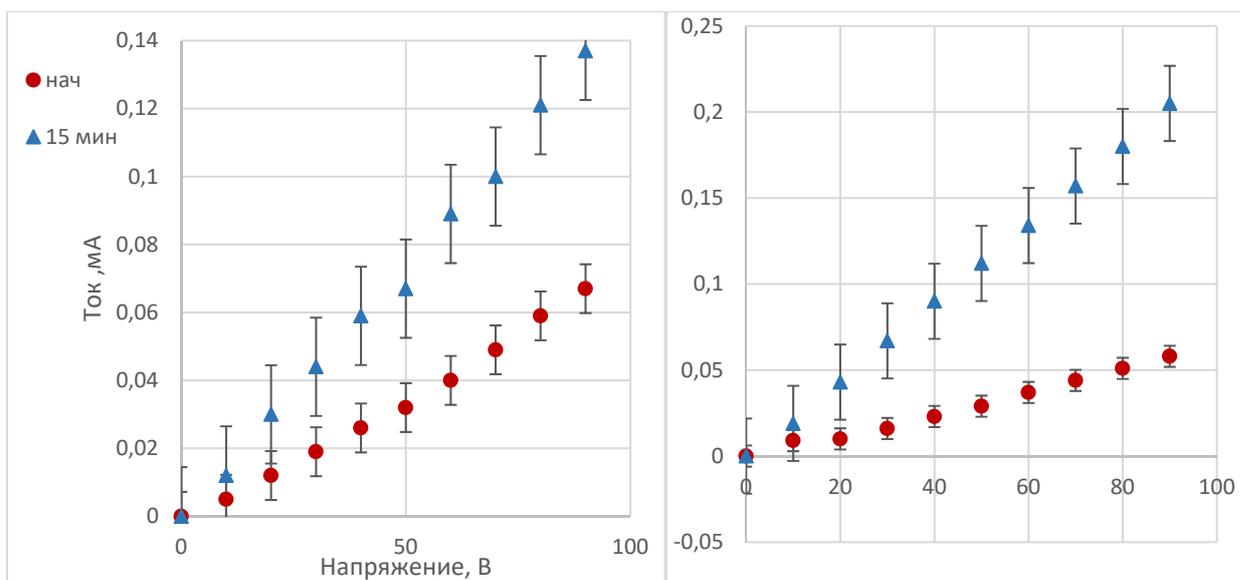
Коэффициент разделения для ионов натрия и калия вычисляем по формуле:

$$\kappa = \frac{C_k}{C_{na}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{6.7 \cdot 10^{-4}} = 5.9. \quad (17)$$

А коэффициент разделения для магния и кальция будет:

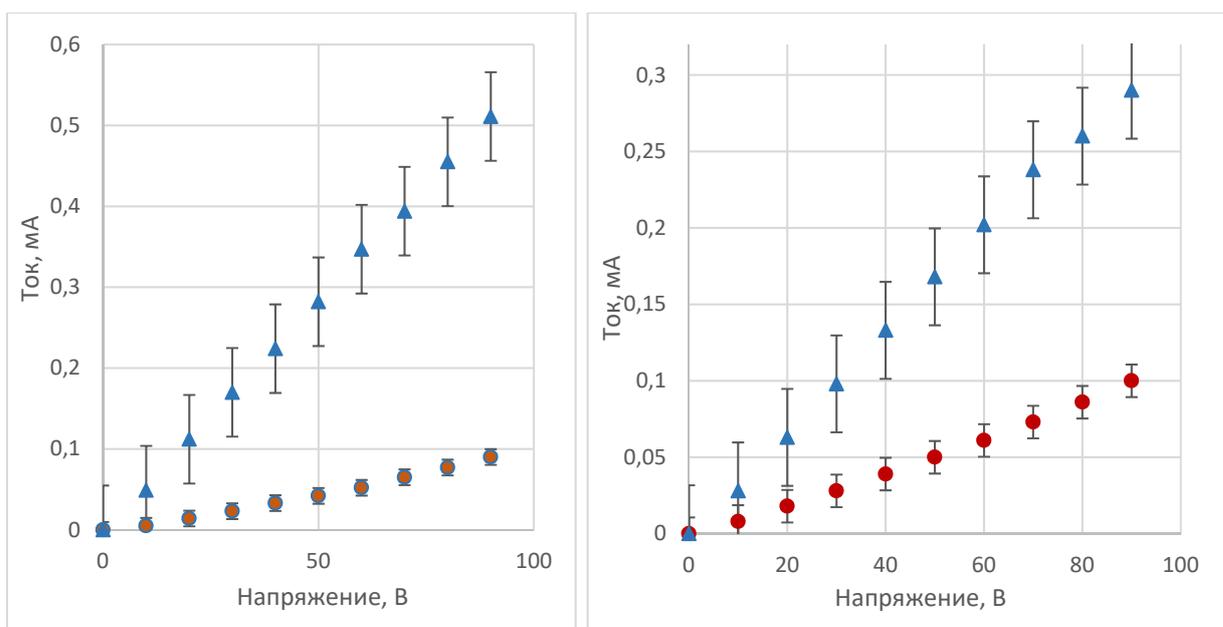
$$\kappa = \frac{C_{Mg}}{C_{Ca}} = \frac{2.4 \cdot 10^{-4}}{1.6 \cdot 10^{-4}} = 1.4.$$

Диаметры пор мембраны №2 составляют ~ 0,16 мкм. Вольт– амперные характеристики для исследуемых растворов представлены на рисунке 25.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 25 – Вольт – Амперные характеристики мембраны №2 в растворах солей NaCl(а), KCl(б) и CaCl₂(в) MgCl₂(г).

При анализе Вольт – Амперной характеристики было выявлено что ионы натрия и калия ведут себя так же, как и в предыдущем случае. Однако, как можно увидеть ток растворов CaCl₂ и MgCl₂ возрастает со временем сильнее чем на мембране №1. Так же ток раствора, содержащий ионы кальция выше чем ток

раствора, содержащий растворы магния. Данные результаты можно объяснить тем что используемая в данном эксперименте мембрана имеет наименьший угол смачивания из всех исследуемых образцов. В таблице 7 приведены значения концентрации растворов после фильтрацию через мембрану №2.

Таблица 7 – Таблица концентраций растворов после фильтрации через мембраны №2

	C ,моль/дм ³
Na	$7,746 \cdot 10^{-4}$
K	$9,638 \cdot 10^{-4}$
Mg	$1.447 \cdot 10^{-4}$
Ca	$1.802 \cdot 10^{-4}$

Тогда коэффициент извлечения для натрия:

$$R_{Na} = \frac{C_k}{C_{нач}} = \frac{3,9 \cdot 10^{-4}}{0,01} = 0,039 .$$

Аналогичный расчет проведен и для других ионов.:

$$R_K = 0,096 ;$$

$$R_{Mg} = 0,014 ;$$

$$R_{Ca} = 0,018 .$$

Коэффициент разделения натрия и калия:

$$\kappa = \frac{C_k}{C_{na}} = \frac{9,6 \cdot 10^{-4}}{3,9 \cdot 10^{-4}} = 2.4$$

Коэффициент разделения магния и кальция

$$\kappa = \frac{C_{Mg}}{C_{Ca}} = \frac{1,4 \cdot 10^{-4}}{1,8 \cdot 10^{-4}} = 0.8$$

Для мембраны №3 начальные концентрации солей были увеличена до

0,25 моль/дм³ для уменьшения времени эксперимента, поскольку с уменьшением диаметра пор, уменьшается и площадь пропускания ионов. Вольт – Амперная характеристика для исследуемых растворов представлена на рисунке 26.

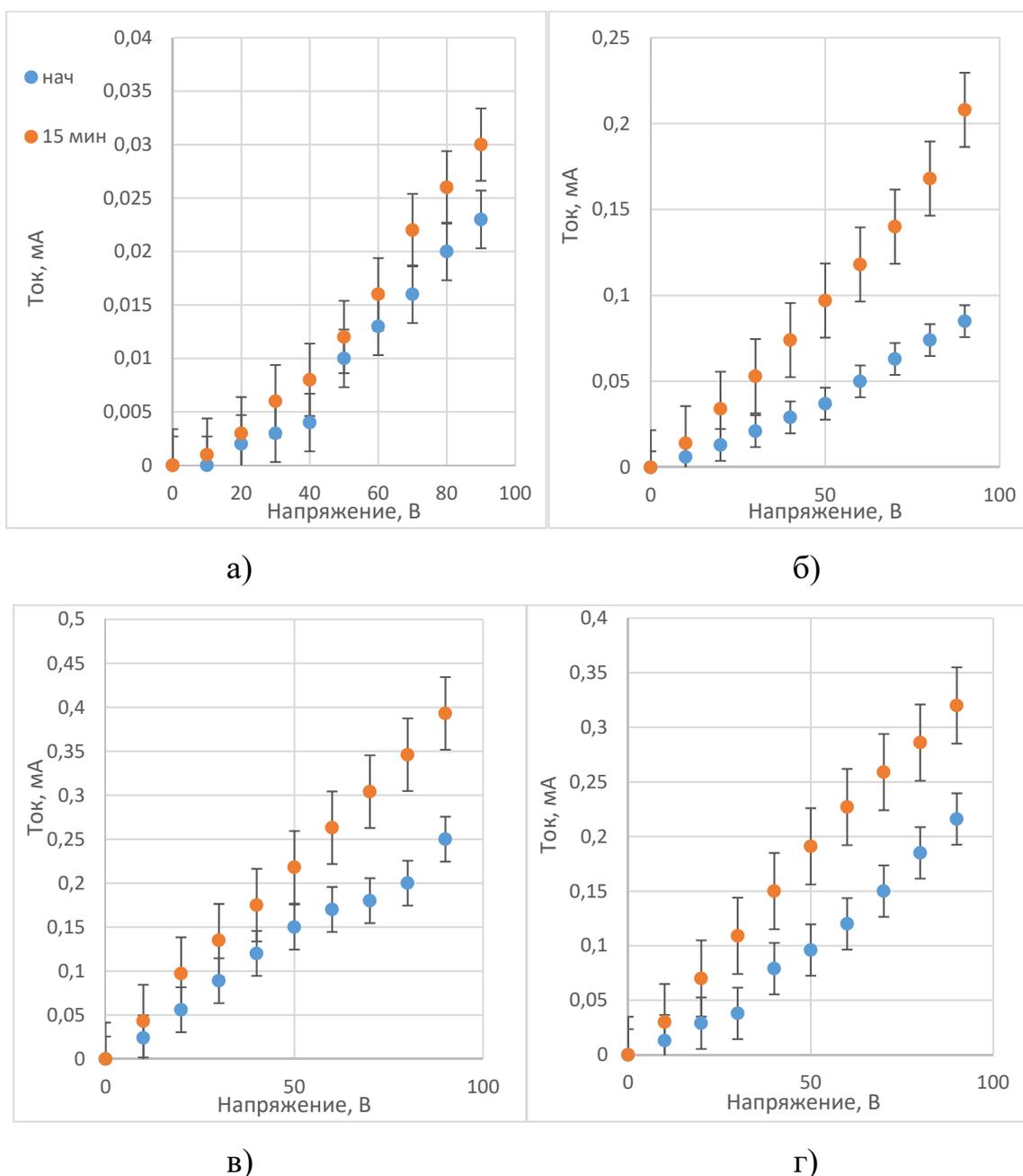


Рисунок 26 – Вольт – Амперные характеристики мембраны №3 в растворах NaCl (а), KCl (б) и MgCl₂ (в) CaCl₂ (г).

Из графиков ВАХ для данных растворов, представленных на рисунке 26, можно сделать вывод, что скорость переноса через мембрану №3 схожа с

скоростью переноса ионов через мембрану №1. Концентраций получены растворов представлены в таблице 8.

Таблица 8– Таблица концентраций растворов после фильтрации через мембраны №3

	C ,моль/дм ³
Na	$2.25 \cdot 10^{-3}$
K	$4.9 \cdot 10^{-3}$
Mg	$2 \cdot 10^{-4}$
Ca	$1.7 \cdot 10^{-4}$

Коэффициент извлечения для ионов натрия:

$$R_{Na} = \frac{C_k}{C_{нач}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-3}}{0,25} = 0,009 .$$

Аналогичный расчет для других веществ:

$$R_K = 0,02 ;$$

$$R_{Mg} = 0,0008 ;$$

$$R_{Ca} = 0,0007 .$$

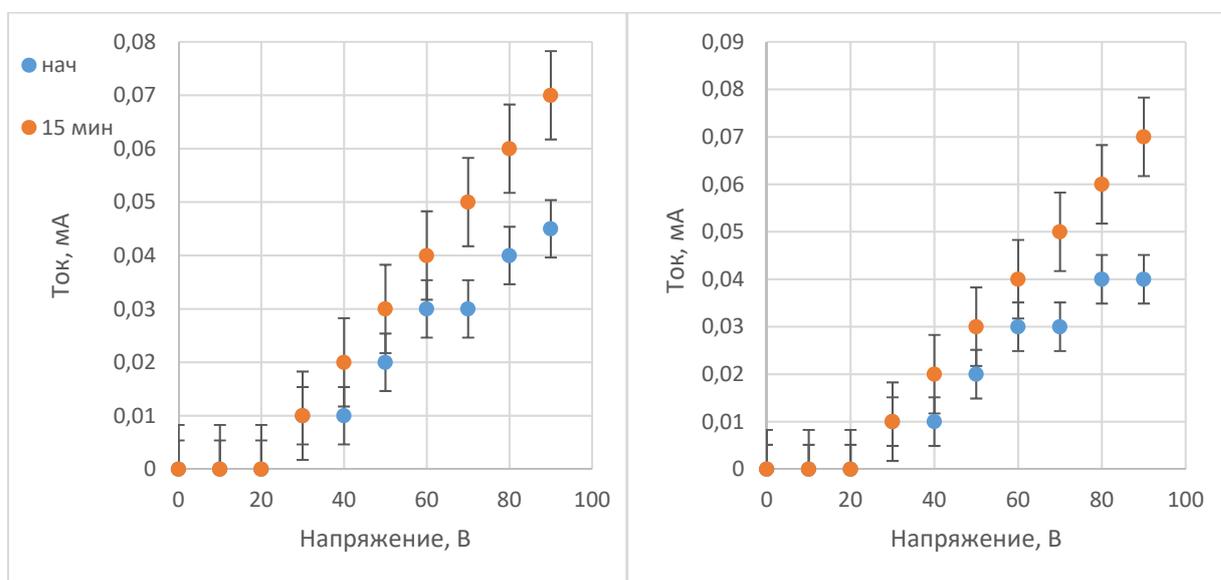
Коэффициент разделения ионов натрия и калия:

$$\kappa = \frac{C_k}{C_{na}} = \frac{4,9 \cdot 10^{-3}}{2,2 \cdot 10^{-3}} = 2.1$$

Коэффициент разделения ионов магния и кальция

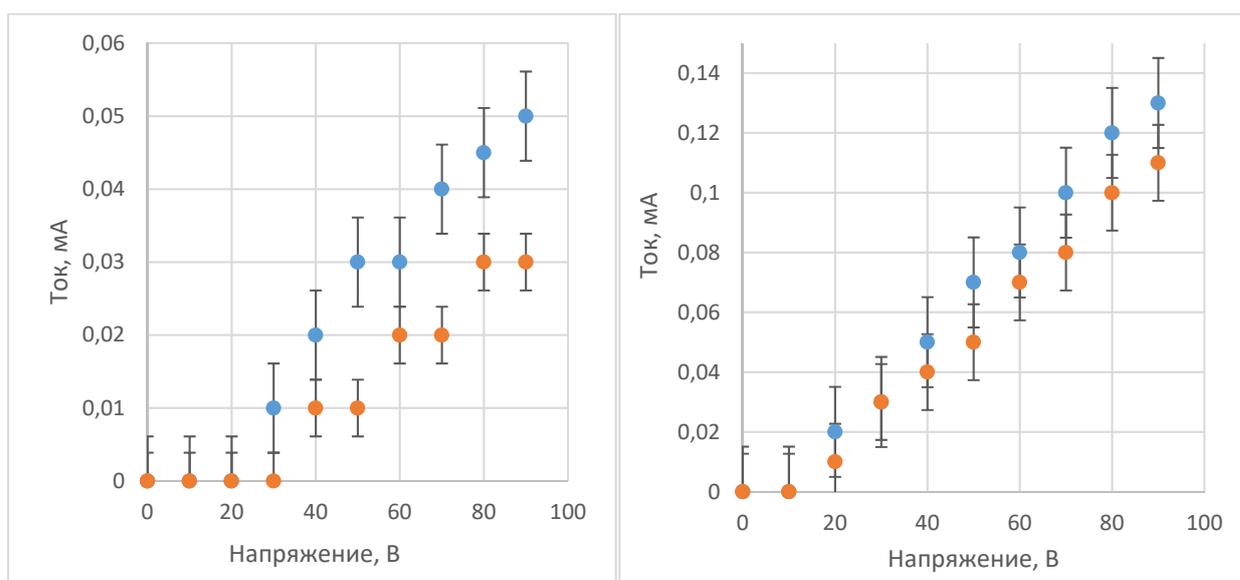
$$\kappa = \frac{C_{Mg}}{C_{Ca}} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{1,7 \cdot 10^{-4}} = 1.13$$

Диаметры пор для мембраны №4 составляют 90 нанометров. Концентрация растворов составляет 0,25 моль/дм³. Вольт – Амперная характеристика для исследуемых растворов представлена на рисунке 26.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 27 – ВАХ мембраны №3 в растворах солей NaCl (а), KCl (б) и MgCl₂ (в) CaCl₂ (г)

Из полученных данных видно, что скорость переноса ионов кальция и магния со временем уменьшается. Из этого можно сделать вывод что при уменьшении

диаметра пор скорость переноса ионов уменьшается. Данные о концентрациях полученных растворов представлены в таблице 9.

Таблица 9– Таблица концентраций растворов после фильтрации через мембраны №4

	C ,моль/дм ³
Na	$4.1 \cdot 10^{-4}$
K	$1 \cdot 10^{-3}$
Mg	$1 \cdot 10^{-4}$
Ca	$8.3 \cdot 10^{-4}$

Коэффициент извлечения для натрия:

$$R_{Na} = \frac{C_k}{C_{нач}} = \frac{4.1 \cdot 10^{-4}}{0.25} = 0,002 .$$

Аналогичный расчет для других элементов:

$$R_K = 0,004 ;$$

$$R_{Mg} = 0,0004 ;$$

$$R_{Ca} = 0,0003 .$$

Коэффициент разделения натрия и калия:

$$\kappa = \frac{C_K}{C_{Na}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{4,1 \cdot 10^{-4}} = 2.4$$

Коэффициент разделения магния и кальция

$$\kappa = \frac{C_{Mg}}{C_{Ca}} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{8,3 \cdot 10^{-5}} = 1.2$$

3.7 Исследование возможности Разделение лантаноидов с использованием трековых мембран.

Разделение ионов лютеция и иттербия производилась на 2х асимметричных мембранах №5 и №6, параметры которых приведены выше в таблице 4.

На первом этапе исследования происходила оценка скорости переноса ионов лютеция и иттербия через трековую мембрану в растворе полярного диэлектрика.

Вольт-Амперная характеристика элементов снималась для раствора каждой соли. Для проведения исследования готовились растворы солей лютеция и иттербия в равных молярных концентрациях. После снятия отдельных ВАХ были проведены исследования с раствором где молярное содержание элементов было равным. После каждого эксперимента мембраны промывались в ванне с дистиллированной водой. Так же проводилась очистка камеры для устранения загрязнения.

Для исследований разделения растворов с мембраной №6, поры которой имеет ~ 70 нм. Вольт – Амперные характеристики растворов солей лютеция и иттербия представлены на рисунке 28.

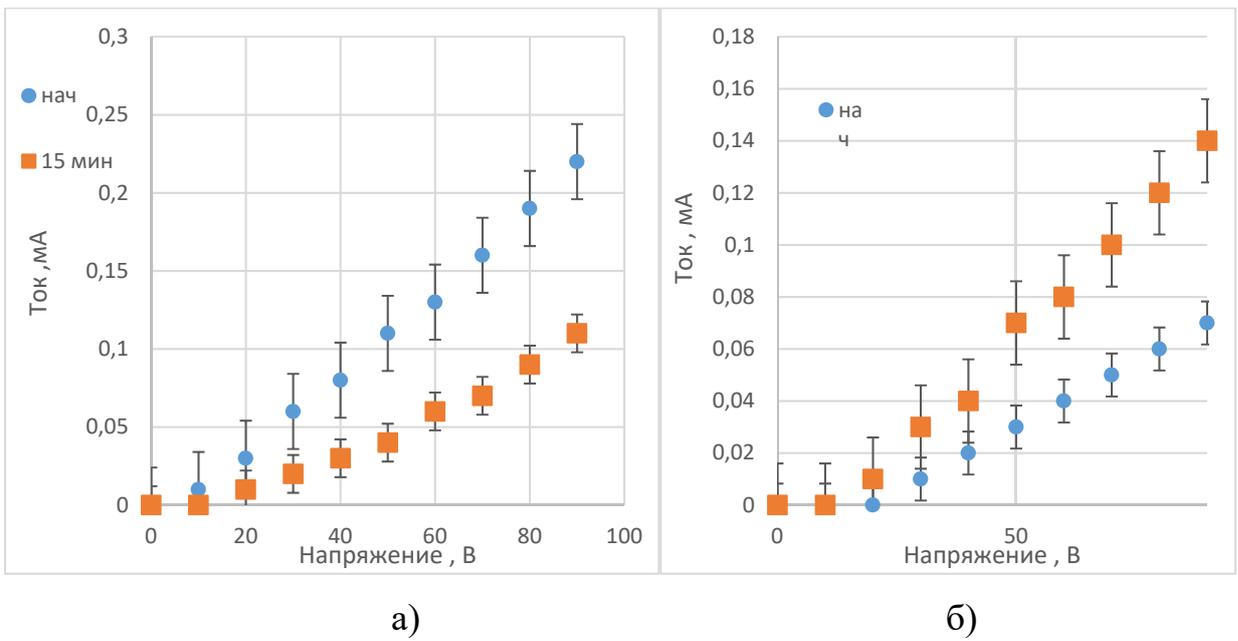


Рисунок 28 – Вольт – Амперные характеристики мембраны №6 в растворах Lu_2Cl_3 (а) и Yb_2Cl_3 (б)

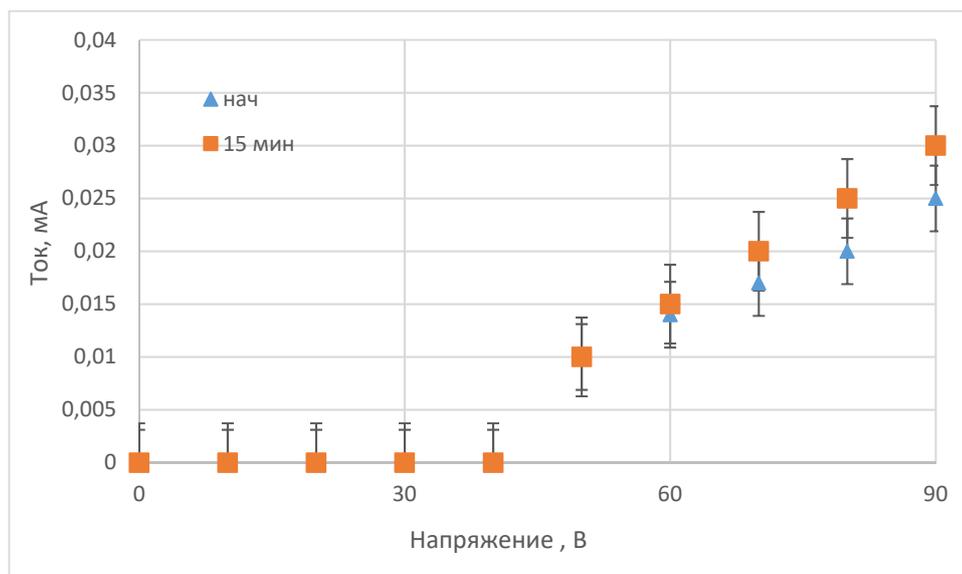


Рисунок 29– Вольт – Амперные характеристики мембраны №6 растворе Lu_2Cl_3 и Yb_2Cl_3

Мембрана №5 имеет диаметр пор около 50 нм. Так же проводилась оценка скорости переноса ионов через трековую мембрану.

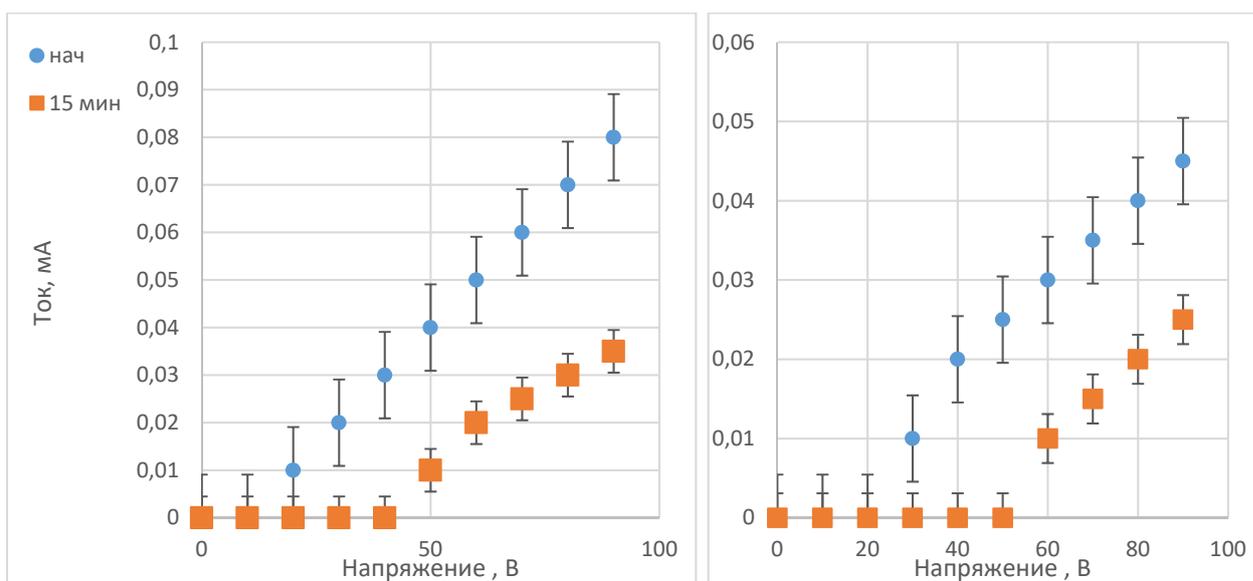


Рисунок 30 – Вольт – Амперные характеристики растворов Lu_2Cl_3 (а) и Yb_2Cl_3 (б) через мембрану №5

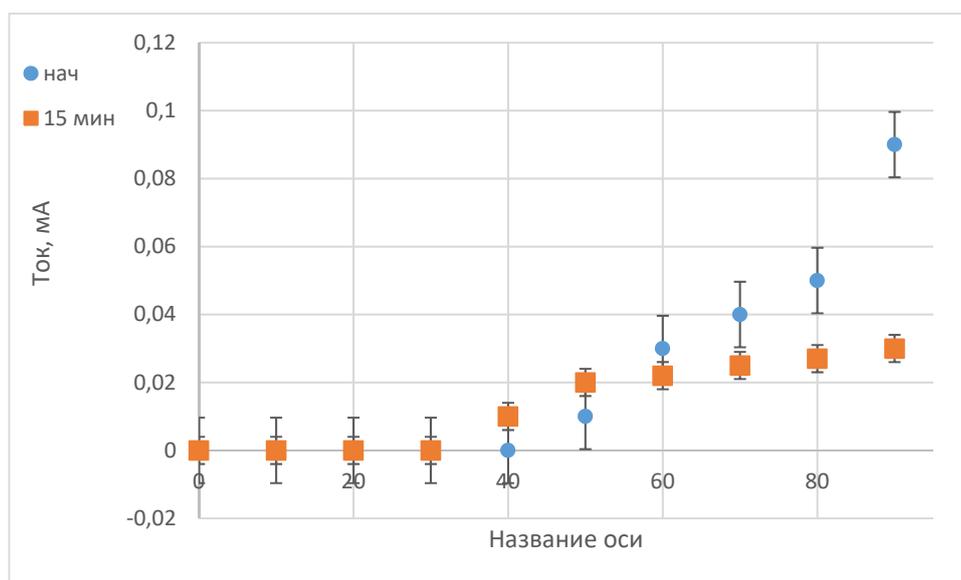


Рисунок 31 – Вольт – Амперные характеристики раствора Lu_2Cl_3 и Yb_2Cl_3 через мембрану №5

На Вольт-Амперной характеристике мембраны №6, диаметр пор которых составляет 0,095 мкм, можно увидеть уменьшение тока для мемbrane в растворе соли иттербия. При этом ток для раствора соли лютетия с течением времени увеличивается. При одновременном прохождении через мембрану ионов лютетия и иттербия ток не уменьшался.

В эксперименте с мембраной №5, диаметр пор которых около 0,05 мкм, ток для мемbrane в растворах солей лютетия и иттербия уменьшается как при

раздельном прохождении, так и при одновременном прохождении ионов лутеция и иттербия через мембрану.

Возможно перенос ионов иттербия через мембрану уменьшался из-за заполнения ионами пор. Для подтверждения данного результата, поверхность мембраны через которую проходили ионы лутеция и иттербия, была исследована при помощи метода Резерфордского обратного рассеяния.

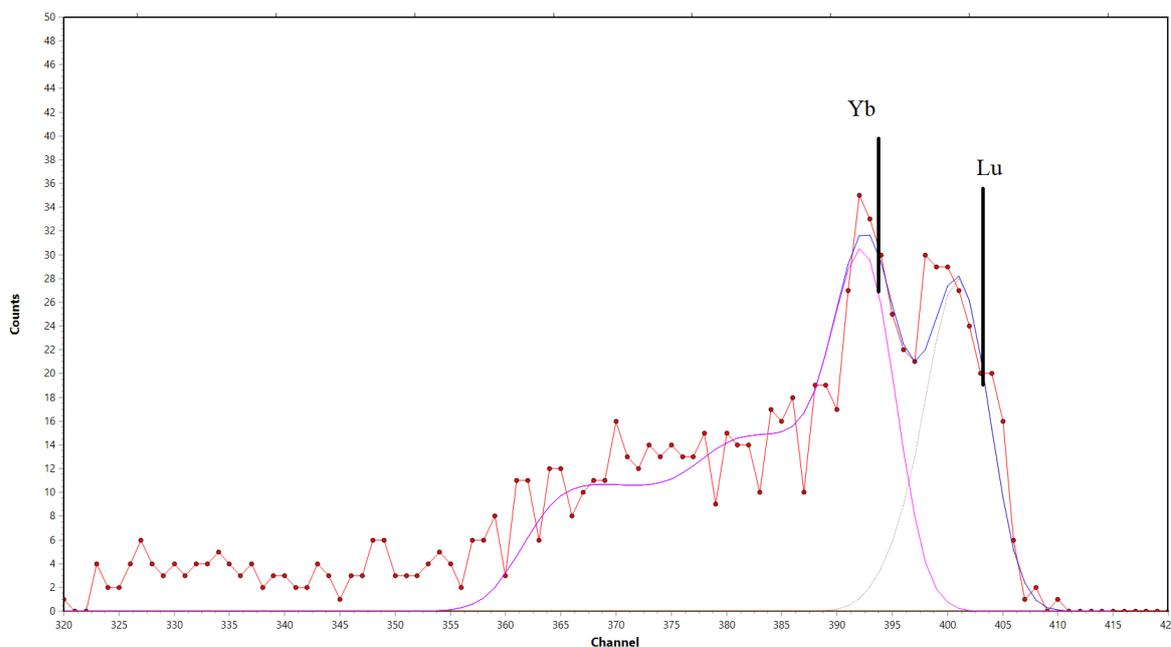


Рисунок 32 – Энергетический спектр Резерфордского обратного рассеяния трековой мембраны.

Из данного спектра можно увидеть, что на поверхности пленки остались атомы лутеция, а треки заполнены иттербием. По данным исследований можно сделать вывод о том, что перенос ионов иттербия через мембрану затруднен в отличие от ионов лутеция, вероятно из – за разности размеров гидратных оболочек.

3.8 Определение возможности разделения ионов в растворе полярного диэлектрика с использованием ионообменной мембраны.

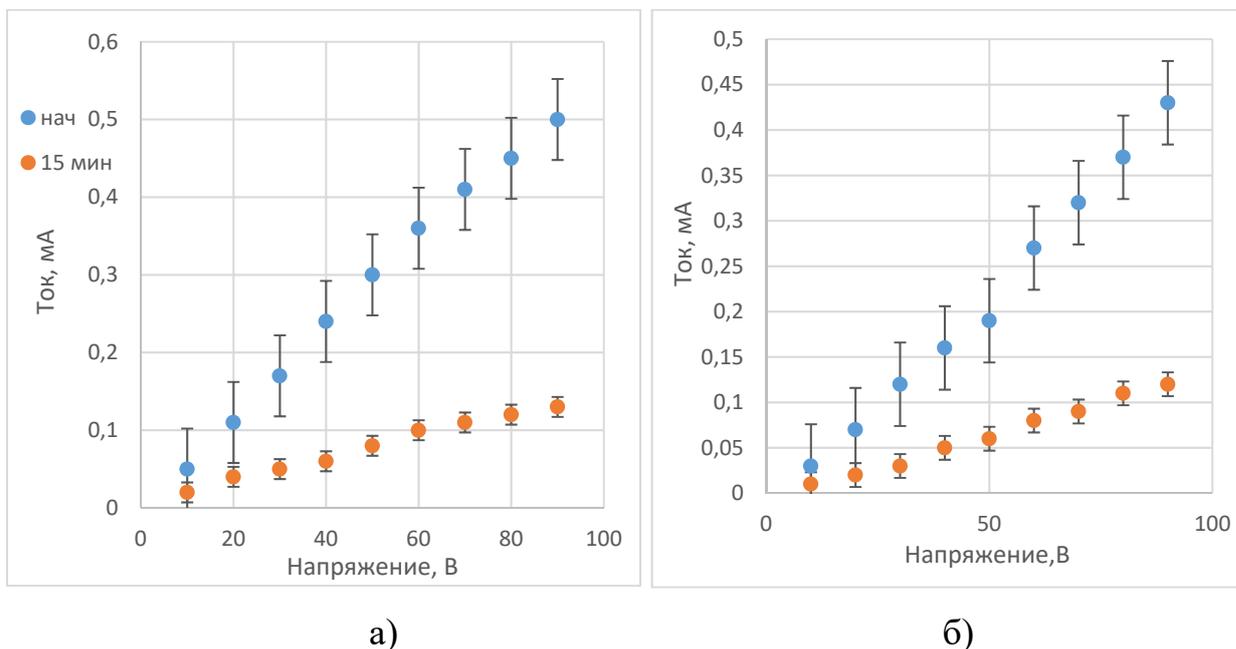


Рисунок 33 – Вольт – Амперные характеристики мембраны №5 в растворе солей Lu_2Cl_3 (а) и Yb_2Cl_3 (б).

Из рисунков, приведенных выше видно, что ток для растворов со временем уменьшается. Также можно увидеть, что растворы Lu_2Cl_3 и Yb_2Cl_3 имеют схожие вольт амперные характеристики. Имея эти данные можно предположить, что скорость переноса ионов лутеция и иттербия имеет схожие значения. Из этого можно сделать вывод что ионообменная мембрана имеет низкую разделительную способность для данных ионов.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, проведенных в процессе работы над магистерской диссертацией, можно сделать следующие выводы:

1. Получены экспериментальные образцы трековой мембраны из полимера ПЭТФ при облучении высокоэнергетическими альфа-частицами с последующим химическим травлением.

2. Показано, что трековые мембраны, сформированные по данной технологической модели, могут иметь большую плотность пор;

3. Из исследований ТМ на растровом электронном микроскопе следует, что при формировании сквозных пор нанометрового размера существует сильный разброс по диаметрам пор

4. Показана возможность изменение селективных свойств изменением гидрофильности поверхности мембраны.

5. Полученные экспериментальные зависимости проницаемости ионов солей через мембрану под действием электрического поля. Из полученных данных можно сделать вывод о возможности применения данных трековых мембран в процессах разделения ионов металлов.

6. Выявлено, что прохождение ионов иттербия через мембрану с порами $\sim 5-70$ нм затруднено, в отличие от ионов лютеция.;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была получена трековая мембрана, облученная альфа-частицами с нанометровыми (50-2000) порами.

Высокая степень ионизация альфа частиц позволяет получать высокие плотности пор в ТМ 10^{13} пор/см². Толщина пленки может быть увеличена более 100 мкм если в процессе очистки растворов необходимо воздействие на мембрану высокого давления. Было выявлено, что создания нанометровых пор возможно увеличить дозу облучения для увеличения плотности пор. Данное решение позволит увеличить скорость переноса ионов.

Представлены экспериментальные данные которые позволяют оценить возможность разделения ионов металлов электро – мембранным методом.

Из приведенных данных следует, что возможно разделение ионов одного заряда. При разделении ионов лютетия и иттербия через мембрану с порами от 5 до 50 нанометров может происходить торможение в переносе ионов. Скорее всего это связано с накоплением ионов в треках, вследствие чего останавливается процесс разделения. Однако, при увеличении диаметра пор до 70 нм вольт–амперная характеристика мембраны в растворе соли лютетия не имеет спада. Из этого можно сделать вывод что разделение лютетия и иттербия возможно реализовать на данных трековых мембранах. Накопление ионов в порах трековых мембран приведет к остановке процесса разделения. Устранение полного заполнения пор, возможно реализовать переменным электрическим полем.

Разработанные методики являются перспективными для актуальной проблемы разделения ионов радионуклидов в растворах полярных диэлектриков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Apel P. Track etching technique in membrane technology //Radiation Measurements. – 2001. – Т. 34. – №. 1. – С. 559-566.
2. Baker R. W. Membrane technology and applications //John Wiley & Sons, Ltd. – 2004.
3. Ярославцев А. Б. Мембраны и мембранные технологии //М.: Научный мир. – 2013. – С. 126-163.
4. Мчедlishvili Б.В., Березкин В.В., Олейников В.А. и др.// Кристаллография, 2006. Т.51. № 25. С.169.
5. Гольданский В.И., Ланцбург Е.Я., Ямпольский П.А. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т.21. №12. С. 365.
6. Каплан И.Г., Митерев А.М. // Химия высоких энергий. 1985. Т. 19. № 3. С. 208.
7. Fleischer R. L., Price P. B., Walker R. M. Nuclear tracks in solids: principles and applications. – Univ of California Press, 1975.–С. 20.
8. Третьякова С. П. Диэлектрические детекторы и их использование в экспериментальной ядерной физике //Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1992. – Т. 23. – №. 2, – С. 366-384.
9. FEDERATION R. Joint ICTP-IAEA Workshop on Nuclear Reaction Data for Advanced Reactor Technologies. – 2010.
10. Немец О.Ф. Справочник по ядерной физике / Немец О.Ф, Ю.В. Гофман. Киев. «Наукова думка». – 1975. - С. 80.
11. Денисов С. П. Ионизационные потери энергии заряженных частиц //Соросовский образовательный журнал. – 1999. – №. 11. – С. 90-96.
12. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/partmat/pm01.htm>.

13. Апель Павел Юрьевич. Треки ускоренных тяжелых ионов в полимерах / Российская академия наук, институт физической химии. – Москва, 1998, – С. 5-150.
14. Вторичная ионизация [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ihem/ihem02.htm#2.5>.
15. Cucinotta F. A. et al. Radial dose distributions in the delta-ray theory of track structure //AIP Conference proceedings. – AIP, 1996. – Т. 362. – №. 1. – С. 245-265.
16. Курахмедов, А.Е. //Асимметричные трековые мембраны, получаемые методом двустороннего облучения на циклотроне дц-60. Мембраны и мембранные технологии, 7(3)// 155–164
17. Apel P. Y., Pretzsch G. Investigation of the radial pore-etching rate in a plastic track detector as a function of the local damage density around the ion path //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. – 1986. – Т. 11. – №. 1-2. – С. 45-53.
18. Semenyuk A.V., Svergun D.I., Mogilevski L.Y., Berezkin V.V., Mchedlishvili B.V., Vasiliev A.B. Small angle X-ray scattering investigation of the pore structure of nuclear filters // J. Appl. Cryst. – 1991. – V. 24. – P. 809–810
19. Митерев А. М. Теоретические представления о формировании и эволюции треков заряженных частиц //Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172. – №. 10. – С. 1131-1164.
20. Краисц Л. И., НЛмитрисв С., Лпсль П. Л. О. Получение и свойства полипропиленовых трековых мембран. – 1997. – С. 1-12.
21. Ярославцев А. Б. Мембраны и мембранные технологии //М.: Научный мир. – 2013. – С. 126-163.
22. Bhagwat A. M. Solid State Nuclear Track Detection: Theory and Applications. – 1993. – С. 12.
23. Track-etched membranes [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hahnemuehle.com/fileadmin/user_upload/bilder/filtration/pdf/FILTRATION_Flyer_6seiter_TEM_Track_Etched_Membranes_EN.pdf.

24. Kravets L. I., Dmitriev S. N., Apel P. Y. Production and properties of polypropylene track membranes //Collection of Czechoslovak chemical communications. – 1997. – Т. 62. – №. 5. – С. 752-760.
25. Vater P. Production and applications of nuclear track microfilters //International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. – 1988. – Т. 15. – №. 1-4. – С. 743-749.
26. Komaki Y. et al. Heavy ion track microfilter of polyimide film //Polymer communications. – 1989. – Т. 30. – №. 2. – С. 43-44.
27. Vilensky A. I. et al. Polyimide track membranes for ultrafiltration and microfiltration //Polymer science. – 1994. – Т. 36. – №. 3. – С. 391-400.
28. Ильина С.И. Электромембранные процессы: учебное пособие./ С.И. Ильина – М. РХТУ им. Менделеева, 2013. – 57с.
29. Г.Г. Каграманов. Диффузионные мембранные процессы: учебное пособие./ – М. РХТУ им. Менделеева, 2009. – 73с.
30. Фам Тхи Ле На/ Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. Вып. 2
31. ГОСТ 24234-80 Пленка полиэтилентерефталатная. Технические условия. – С. 3.
32. Полиэтилентерефталат. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/полиэтилентерефталат>.
33. Сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM-1000. [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/05/09/Hitachi_TM1000_SEM_USERMANUAL_v1.pdf.
34. Атомно-силовой микроскоп Интегра-Терма-Прима (NT-MDT). [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ntmdt-si.ru/modular-afm/prima>
35. ГОСТ 12.0.003-74. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. – Введ.1976.01.01. – М.: 1976, 34 с.

36. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 01.01.76.- М: 1976, 7 с.

37. ГОСТ 12.1.019-2009/ ССБТ. Электробезопасности. Общие требования и номенклатура видов защиты. – Введ. 2011.01.01. – М.: 2011, 13 с.