

*Форма открытия
Проекта*

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

" ____ " _____ 2023 г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ ПРОЕКТА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы (для продлеваемых проектов) – *шифр темы включает дату открытия, дата окончания не указывается, т. к. она определяется сроками завершения проектов в теме.*

1.2. Шифр проекта (для продлеваемых проектов)

1.3. Лаборатория

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова

1.4. Научное направление

Физика конденсированных сред, радиационные и радиобиологические исследования

1.5. Наименование проекта

Нанокompозитные и функциональные трековые мембраны

1.6. Руководитель проекта

Д.х.н. П.Ю. Апель,

1.7. Заместитель руководителя проекта

к.х.н. А.Н. Нечаев

2. Научное обоснование и организационная структура

2.1. Аннотация

Существующие и создаваемые ускорители тяжелых ионов в ЛЯР ОИЯИ предлагают уникальные возможности для междисциплинарных исследований, особенно в области материаловедения и нанотехнологий. Ускоренные тяжелые ионы создают огромные плотности энергии вдоль своей траектории в веществе, оставляя наномасштабные следы повреждений с высоким аспектным соотношением, известные как ионные треки. Технология ионных треков использует уникальные свойства ионных треков для получения нано- и микропористых материалов.

Трековые мембраны (ТМ) являются примером промышленного применения ионно-трековых технологии. ТМ имеют явные преимущества перед обычными мембранами благодаря своей точно определенной структуре. Размер, форма и плотность пор могут быть изменены контролируемым образом, что позволяет получить мембрану с требуемыми характеристиками массопереноса и селективности. Области применения традиционных ТМ можно разделить на три группы: технологическая фильтрация, клеточные культуры и лабораторная фильтрация. Применение ТМ в биотехнологии и медицине особенно актуальны.

Современные тенденции в биологии, медицине, экологических исследованиях, альтернативных источниках энергии и других областях формулируют требования к мембранам с определенными новыми функциональными возможностями. Эти функциональные возможности могут быть обеспечены путем настройки (регулировки) геометрии, морфологии и химических свойств ТМ. Настоящий проект будет направлен на разработку различных функциональных ТМ с использованием следующих подходов:

1. Регулируемая архитектура пор;
2. композитные структуры;
3. гибридные структуры;
4. целенаправленная химическая и биохимическая модификация.

Таким образом, одной из целей проекта будет поиск приложений нанокompозитных и функциональных ТМ с индивидуальной архитектурой пор и функциональностью для нанотехнологии, биомедицины, сенсорных технологий и процессов мембранного разделения.

Успешная разработка нанокompозитных и функциональных ТМ предполагает использование пучков тяжелых ионов (циклотроны ИЦ-100 и ДЦ-140) для создания ансамблей латентных треков и их УФ-сенсibilизации с последующим травлением или экстракцией для получения одно- или многопоровых мембран/шаблонов с требуемыми структурными параметрами. Для определения характеристик нанокompозитных и функциональных ТМ будут использованы следующие аналитические методы: микроскопические (SEM/EDX, AFM, TEM/SAED), спектроскопические (FT-IR, UV-Vis., XPS, ICP-OES, фотолюминесценция) и термический анализ (DSC, TGA).

Достижения в технологии ускорителей за последние десятилетия позволили изготавливать моно- и олиго поровые мембраны, что расширило исследования в области нанофлюидики и позволило манипулировать ионным/молекулярным транспортом. Кроме того, различные методы химического травления и экстракции позволяют изменять геометрию пор (конус, цилиндр, воронка и другие). Другим преимуществом ТМ является возможность модификации поверхности за счет взаимодействия с функциональными группами, образующимися при травлении. Поэтому еще одной целью работы будет углубленное понимание поверхностных и наноразмерных явлений в ограниченном пространстве различных геометрий нанопор. Обладая этими фундаментальными знаниями, переход от моно- и олигопоровых к многопоровым мембранам позволит идеально контролировать свойства мембран и обеспечит отличную возможность перехода от лабораторных исследований к реальным приложениям.

Внедрение новых свойств в существующие мембраны путем модификации поверхности методами “мокрой химии” и физического осаждения из паровой фазы (англ. physical vapor deposition, PVD) является эффективным подходом при разработке новых мембранных материалов. Эти методы могут обеспечить чувствительность к определяемым анализам, импортировать биологически активные молекулы, повысить селективность ионов при использовании в альтернативных источниках энергии.

Путем функционализации протравленные нанопоры будут использоваться для изучения транспорта ионов в замкнутых пространствах с высоким аспектным соотношением и для разработки мембран, реагирующих на специфические аналиты. Для функционализации ТМ в проекте будет использована химическая прививка, включая прививку белков и “послойное” (англ. layer-by-layer, LBL) осаждение полиэлектролитов.

Химическая прививка небольших органических молекул с помощью катализируемых химических реакций между карбоновой кислотой и аминами может иммобилизовать полимерные щетки внутри протравленных нанопор. Этот тип функционализации ТМ будет применяться для разделения энантиомеров. Химическая прививка белков на поверхность ТМ посредством адсорбции, ковалентной связи и специфического распознавания будет задействована в технологии нанопор для обнаружения РНК и ДНК и биосенсинга. Радиационно-индуцированная прививочная полимеризация будет использована в качестве метода введения различных функциональных мономеров в нанопористую структуру поливинилиденфторидных (ПВДФ) мембран для использования в качестве электрохимических сенсоров токсичных металлов в воде.

Послойное осаждение – технология синтеза наноматериалов “снизу вверх”, который использует преимущества процессов самосборки наночастиц и взаимодополняющих их макромолекул. Применение послойной адсорбции полиэлектролитов (полиэтиленимин, поливинилпирролидон, полисахариды) в трековых мембранах может изменить плотность поверхностного заряда, гидрофильность и способность к сорбции белков. Подход послойного осаждения станет предварительным этапом разработки нанокompозитных ТМ для последующей модификации поверхности наночастицами серебра и золота, квантовыми точками и аффинными лигандами (антитела и аптамеры) для быстрого и чувствительного обнаружения опасных вирусологических заболеваний, таких как рото- и коронавирусы, в очень низких концентрациях с использованием поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния и флуоресцентной спектроскопии. ТМ, модифицированные полиэлектролитами, будут использоваться также в технологии разделения экзосом и раковых клеток из крови человека. Модификация ТМ наноконъюгатами наночастиц серебра и вирулицидных/бактерицидных соединений с использованием бифункциональных сшивающих агентов позволит разработать фильтрационные материалы, обладающими стерилизующими свойствами.

Модификация поверхности ТМ неорганическими наноматериалами повысит эффективность разделения и позволит придать им новые функции, например фотокаталитические. PVD (термическое вакуумное осаждение и магнетронное распыление) является эффективным инструментом для нанесения неорганических наноматериалов в виде тонких слоев и наночастиц на поверхность ТМ. ТМ с нанесенными тонкими слоями благородных металлов и сплавов демонстрируют поверхностный плазмонный резонанс и могут быть эффективными платформами для проточных биосенсоров. Дополнительная функционализация поверхности ТМ, модифицированная оксидами алюминия или титана, может быть осуществлена за счет применения методов ковалентного связывания с водорастворимыми силанами, используемыми при получении аффинных сорбентов.

Технология электроспиннинга нановолокон из различных волокнообразующих полимерных растворов на ТМ с предварительно нанесенным покрытием из проводящего слоя расширяет возможности производства гибридных мембран. Функционализация нановолоконных структур, в свою очередь, станет основой для разработки различных композиционных материалов с селективными комплексными соединениями, лигандами и наночастицами. Это позволит использовать такие гибридные ТМ для удаления коллоидов и ионных форм токсичных ионов, включая радионуклиды, в питьевой воде. Гибридные ТМ с нановолокнами из биоразлагаемых

полимеров будут использоваться в качестве платформы для клеточных технологий и в регенеративной медицине.

В заключение следует отметить, что решение задач проекта позволит расширить научные знания в области радиационной физики и химии конденсированного состояния вещества и будет способствовать разработке новых типов функциональных ТМ благодаря координации усилий экспертов, работающих в междисциплинарных областях исследований. Ожидаемые результаты проекта будут включать реализацию новых и совершенствование существующих подходов модификации мембран для получения нанокompозитных и функциональных ТМ для целевого применения в нанофлюидике, сенсорных технологиях, альтернативных источниках энергии и биомедицине.

2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Цель

Разработка функциональных нанокompозитных трековых мембран для различных применений - нанотехнологий, биомедицины, сенсорной техники и новых процессов мембранного разделения.

Актуальность и научная новизна

ТМ представляют собой уникальный тип мембран с контролируемой структурой и архитектурой пор [1, 2]. ТМ являются ярким примером совместной научно-технической реализации принципов технологии ионных треков, радиационной химии, химии полимеров, мембранной и коллоидной химии. Коммерческие ТМ на основе полиэфирных пленок являются высокотехнологичными продуктами межотраслевого применения. Они используются в процессах промышленной и бытовой очистки воды, в производстве противовирусных вакцин и биологических продуктов, в системах индикации энтеробактерий и простейших в питьевой и сточной воде, плазмаферезе и инфузионной терапии, в микрофлюидных устройствах [1, 3]. ТМ находят все большее применение в быстро развивающихся и перспективных областях, таких как биотехнология и медицина. Они предлагают эффективные решения для профилактики и диагностики эпидемиологических заболеваний и разработки персонализированной защиты от вредных факторов окружающей среды. Однако потенциал ТМ еще не исчерпан. Следующий этап в развитии применения ТМ связан с модификацией их структуры и поверхностного слоя для решения задач разделения. Основные рабочие параметры ТМ (проницаемость и селективность) в процессах разделения и концентрирования в первую очередь определяются их структурными параметрами и свойствами поверхности, такими как смачивание, электрокинетические свойства и адсорбция. Компонентами стратегии интенсификации трековых мембран являются:

1. инновационные материалы и технологии модификации поверхности;
2. разработка решений для применения ТМ в сенсорах;
3. для диагностики биологических соединений.

Научные исследования в области создания новых мембранных материалов на основе ТМ и ионных трековых технологий, изучения их свойств и фундаментальных аспектов транспортных явлений в мембранах, несомненно, имеют большое значение для будущего. Среди приоритетных направлений в разработке мембранных материалов следует выделить следующие типы: “конструируемые”, “многофункциональные” и “нанокompозитные”, включая “гибридные” [3, 4]. ТМ являются неотъемлемой и важной частью рынка мембран. Поэтому тенденции развития в полной мере относятся и к ним.

В настоящее время, достигнут значительный прогресс в создании и изучении новых конструируемых ТМ с контролируемой структурой и архитектурой пор [4]. Возможность получения таких мембранных материалов является одной из важнейших задач современной мембранной технологии и нанотехнологии. Они могут быть использованы в процессах разделения и химических реакторах, сенсорах, микро- и нанофлюидических устройствах. Разработка методов получения и контроля архитектуры ТМ на наномасштабном уровне значительно расширит области их применения в будущем. Технологии ионных треков успешно доказали, что их использование позволяет создавать мембранные структуры любой желаемой архитектуры. Так, уникальные свойства ТМ с симметричными и асимметричными нанопорами, а именно электрокинетический и осмотический эффекты и ионная селективность в растворах электролитов, показали беспрецедентную производительность и возможность использования для опреснения и разделения молекул. Одним из основных направлений проекта в рамках разработки “конструируемых” ТМ будет изучение проникающих свойств, ионной селективности, структуры и свойств поверхности мембран для электродиализа; применение ТМ как с симметричными, так и асимметричными нанопорами для электро-мембранного разделения ионов; применение асимметричных нанопористых ТМ для ультрафильтрации наночастиц, вирусов и низкомолекулярных веществ, включая энантиомеры хиральных лекарств. Искусственные биомиметические наноканалы на основе ТМ, включая моно-, олиго- и много-поровые массивы, интенсивно используются для моделирования биологических мембран благодаря их выгодной структуре и “диодоподобным” электрохимическим свойствам. Многие исследования показали, что функциональные конические искусственные наноканалы могут быть использованы в качестве новых сенсоров для обнаружения ДНК, белков и других органических молекул. Быстрое развитие нанотехнологий и наук о жизни в последние десятилетия поставило перед исследователями множество новых задач, в том числе и в науке о мембранах. Так называемые ионные каналы играют огромную роль в функционировании живых систем.

Понимание того, как работают эти нанометровые каналы, крайне важно, поскольку они выполняют целый ряд специфических функций. Поэтому одной из задач как теоретиков, так и экспериментаторов было создание искусственных аналогов ионных каналов. Поскольку взаимодействие высокоэнергетического иона с веществом сосредоточено в нанометровых объемах, для создания нанопор различной геометрии успешно используется метод травления треков [1, 2]. Различают два подхода: химическое травление с агрессивными субстанциями и мягкое травление с растворителями (например, водой), дающими возможность получать нанопористые материалы с ион-селективными свойствами по отношению к водным растворам. В основном исследовались пленки полиэтилентерефталата (ПЭТФ) [5, 6]. Таким образом, в практическом плане полученные нанопористые мембраны могут удовлетворять двум целям. Первая касается разделения ионов посредством электродиализа, вторая – разработке наносенсоров, основанных на принципе резистивного импульса [4, 7]. Для полного понимания практического применения пленок необходимо всестороннее понимание свойств мембран с треками пор нанометрового размера.

В рамках настоящего проекта планируется проведение следующих экспериментов:

1. углубленные исследования процессов водной экстракции продуктов радиолиза из ионных треков в различных полимерах, таких как ПВДФ и ПЭТФ;
2. исследования ионной селективности моно- и дивалентных катионов ТМ после экстракции;
3. исследования осмотических и ион-селективных свойств ТМ с асимметричными нанопорами;

4. изучение ион-селективных свойств ТМ с симметричными нанопорами, направленных на разделение важных ионов, таких как Li^+ .

Знания, полученные в результате этих экспериментов, станут основой для разработки новых технологий мембранного разделения и других приложений, таких как сенсорика.

Создание многофункциональных мембран и прогнозирование взаимодействия поверхности мембраны с разделяемым веществом является жизненно важным для широкого использования ТМ в химической технологии и биотехнологиях. Таким образом, основной задачей данной части проекта является целенаправленное изменение эксплуатационных параметров путем функционализации поверхности пор ТМ из полиэфиров, полиолефинов и фторсодержащих полимеров для расширения области их применения. Основным подходом к решению этой задачи является использование химической и физической модификации поверхности уже изготовленных ТМ. Методы, применяемые для модификации ТМ, можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, направленные на изменение химического состава порового пространства мембран с помощью мокрых химических методов. Это могут быть методы ковалентного связывания, адсорбции и комплексообразования, включая метод LBL. Обычно эти методы используются для повышения гидрофильности поверхности ТМ. Вторая группа методов включает вакуумное осаждение для создания тонкого слоя металлов, оксидов металлов и нитридов на поверхности мембраны. Методы вакуумного осаждения могут также применять полимерные слои из широкого спектра полимеров, включая фторсодержащие, для придания поверхности супергидрофобных свойств. В настоящее время активно разрабатываются подходы к синтезу многофункциональных ТМ, модифицированных биологически активными веществами, наночастицами и биодоступными формами их конъюгатов. Такие мембраны могут обладать бактерицидной или вирулицидной активностью. Одним из главных вопросов при разработке ТМ с вирулицидными свойствами является следующий: какие иммобилизованные бактерицидные/вирулицидные агенты могут эффективно нейтрализовать бактериальные/вирусные частицы и их генотоксическое действие? Оценка эффективности ТМ с иммобилизованными вирулицидными агентами для выделения вирусных патогенов и их нейтрализации может быть основана на анализе уровня повреждения ДНК в клеточных культурах.

Проблема разработки многофункциональных ТМ со свойствами средства к биологически активным субстанциям тесно связана с созданием современных тест-систем для медицинской диагностики. Создание быстрых, чувствительных и селективных методов выявления патогенов является одной из важнейших задач здравоохранения и гарантирует национальную безопасность. Растет потребность в быстрой и экономически эффективной лабораторной диагностике инфекционных заболеваний, в выявлении микробиологического загрязнения окружающей среды с использованием так называемых безметочных тестов и биосенсоров. Основными методами экспресс-анализа в таких системах являются флуоресценция, комбинационного рассеяния и масс-спектрометрия [7]. Разработка быстрых, чувствительных и селективных методов обнаружения патогенных микроорганизмов, особенно в случаях, требующих срочной медицинской помощи, остается актуальной задачей здравоохранения. Поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия (англ. Surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS) – высокочувствительный метод, позволяющий обнаруживать молекулы в очень низких концентрациях. Использование раман-активных меток значительно повышает специфичность биосенсоров и пределы обнаружения. Существенное количество отчетов о разработке биосенсоров на основе SERS сосредоточено на использовании антител и аптамеров,

распознающих эпитоп поверхности биомолекулы. Сочетание SERS с ультра- и микрофильтрационными мембранами, способными задерживать вирусы и бактерии, позволяет достичь высокой чувствительности и селективности. Дополнительным фактором специфичности обнаружения маркеров должно стать использование биоаффинных взаимодействий ТМ с иммобилизованными антителами или аптамерами, меченными SERS-репортерами [8]. В связи с этим необходимо разработать методы получения мембранных подложек с желаемыми свойствами, необходимыми для успешного биоаффинного взаимодействия и плазмонно-резонансных свойств. Поэтому необходимо разработать новую функциональную ТМ, сочетающую наночастицы серебра, золота или их сплавов и модулированные диэлектрические структуры на основе полиэфирных нано- и микропористых опор, в которых будет реализован двойной плазмонный и диэлектрический резонанс и достигнуто колоссальное усиление электромагнитного поля. В ряде работ, выполненных в Центре прикладной физики, уже предложен биосенсор на основе ТМ из ПЭТФ, покрытых конъюгированными с аптамерами серебряными наночастицами, для обнаружения вирусов гриппа А и В. При фильтрации с помощью этих многофункциональных ТМ с конъюгатами аптамер-наночастицы серебра был достигнут высокий предел обнаружения вируса гриппа А в плазме крови [8]. Аналогов такого рода, производимых промышленным способом, в мире нет. В дальнейшем будет проведено экспериментальное обоснование гипотез и выбор оптимальных технических решений по модельному выявлению диагностически значимых антигенов аденовирусов или ротавирусов. Важной целью проекта является разработка научных подходов и внедрение технологии проточных сенсоров на основе многофункциональных ТМ, позволяющих значительно повысить селективность аналитической идентификации, особенно эпидемиологически опасных веществ различной природы, снизить стоимость анализа за счет исключения многочисленных реагентов, сред и специализированного оборудования, что позволит проводить анализ в полевых условиях.

За последние годы была проделана большая работа по изготовлению гибридных мембран. Создание микрофильтрационных гибридных мембран с селективными свойствами по отношению к особо опасным соединениям значительно расширит область применения ТМ в технологиях очистки и контроля качества воды. В рамках комплексного развития новых водоочистных сооружений и контроля безопасности источников водоснабжения приоритет отдается разработке интеллектуальных саморегулирующихся систем. Используемые для этих целей мембранные методы должны быть обновлены путем их сочетания с технологиями, основанными на передовых адсорбционно-окислительных технологиях (АОП) для обеззараживания и детоксикации воды с использованием новых наноструктурированных материалов. Благодаря использованию новых наноструктурированных материалов на основе широкополосных полупроводников (TiO_2 , ZnO) эта цель может быть достигнута. Традиционные полимерные мембраны, полученные из растворов полимеров, в отличие от ТМ, практически не могут быть использованы в качестве носителей для производства гибридных мембран. Это связано с трудностями использования методов PVD и CVD для модификации поверхности. Исследования, проведенные в Центре прикладной физики ЛЯР, показали возможность получения гибридных ТМ с использованием термического и магнетронного напыления металлов, их оксидов и нитридов. Дополнительная функционализация поверхности ТМ, модифицированной оксидами алюминия или титана, может быть осуществлена с помощью методов ковалентного связывания с водорастворимыми силанами, используемыми в производстве аффинных сорбентов.

Технология электроспиннинга нановолокон из различных формовочных полимерных растворов, в том числе биполимеров, на ТМ с проводящим покрытием (Ti , Al , Ag) расширяет возможности производства гибридных мембран. Осажденные нановолоконные структуры, в свою

очередь, служат основой для создания различных композиционных материалов с селективными комплексными соединениями, лигандами и наночастицами [9]. Таким образом, производство гибридных мембран необходимо для выполнения санитарно-эпидемиологических требований к качеству воды путем удаления коллоидов и ионных форм токсичных ионов, включая радионуклиды.

Современная мировая доктрина освоения водных ресурсов гласит, что доступ населения планеты к безопасным ресурсам питьевой воды является одним из абсолютных приоритетов. Эта достаточно сложная задача до сих пор комплексно не решена. Разработанная технология получения функционализированных и гибридных ТМ должна обеспечить получение высокоэффективных и селективных сорбционных микрофильтрационных ТМ. Планируется создание линейки мембран с описанием используемого модифицирующего агента. Это позволит потребителям ТМ целенаправленно запрашивать у производителя мембраны в соответствии со своими специфическими потребностями. Присутствие на рынке многофункциональных, нанокompозитных и гибридных ТМ положительно скажется на расширении их использования в безопасной инфузионной терапии, требующей сорбции цитокинов, вирусов и бактерий из инфузионных растворов лекарственных препаратов.

Методы и подходы

Разработанные в рамках реализации программы и тематических планов ОИЯИ научно-методические подходы к созданию нового поколения структурно-химически модифицированных ТМ с улучшенными эксплуатационными свойствами могут стать научной основой для решения существующих технологических проблем при производстве нового поколения ТМ нанотехнологического, биотехнологического и медицинского назначения.

В качестве основных методологических подходов для успешного выполнения целей и задач Проекта, в частности касающихся конструируемых или нанопористых ТМ, будут использоваться следующие методологические подходы:

1. метод облучения пленок полиэфиров пучками тяжелых ионов (энергия 2-4 МэВ/н, dE/dx в диапазоне 2-35 кэВ/нм) с последующим травлением или экстракцией латентных треков в щелочных растворах для получения мембран/шаблонов требуемых структурных параметров с помощью ускорительных установок ЛЯР (ИЦ-100 и планируемой к эксплуатации ДЦ-140);
2. метод травления латентных треков в присутствии анионных (сульфонаты) и неионных соединений (на основе этиленгликолей) в качестве ПАВ для изменения условий поверхностного травления ионных треков;
3. метод травления скрытых треков в присутствии воздействия ультрафиолетового излучения как фактора изменения условий поверхностного травления ионных треков;
4. методы исследования электрических и электрокинетических характеристик ТМ для анализа физико-химического состояния поверхности мембраны и мониторинга состояния модифицированной поверхности, включая вольтамперометрию и импедансную спектроскопию;
5. метод калибровки нанопористых мембран белковыми смесями для анализа структурно-селективных свойств, таких как отсекающий молекулярный вес белков, структура селективного слоя мембраны, дефектность, гидрофильно-гидрофобный баланс поверхности;
6. методы сканирующей электронной микроскопии, адаптированные для изучения наноструктурированных полимерных матриц;

7. методы исследования электрических свойств нанометровых каналов, заполненных солями электролита (проводимость в режимах переменного и постоянного тока, режим электродиализа);
8. методы жидкостной химии и осмотических измерений.

Для завершения проекта и получения моно- и многопоровых ансамблей треков предлагается создать дополнительную специализированную линию облучения высокоэнергетическими ионами Кг и Хе на ускорителе У-400М (методические подходы и предлагаемые протоколы облучения имеются).

Предлагаемая методология ионного пучка будет способствовать получению фундаментальных научных знаний для разработки одно-, олиго- и многопористых ТМ, использующих кластер диодоподобных пор в полимере в качестве строительных блоков для биомиметических мембран следующего поколения и медицинских биосенсоров.

Для разработки многофункциональных и гибридных ТМ будут использованы следующие подходы и методология:

1. традиционная технология травления треков для получения мембран с различными структурными характеристиками;
2. химические методы модификации поверхности путем ковалентного связывания и адсорбции полиэлектролитов;
3. PVD методы, такие как термическое вакуумное испарение и магнетронное напыление металлов и сплавов;
4. методы электроформования нановолокон из полимеров, включая биополимеры;
5. исследования структуры с помощью атомно-силовой микроскопии (AFM), просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции (TEM/SAED);
6. Спектроскопические методы: FT-IR, UV-vis., XPS, фотолюминесценция;
7. Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES) для анализа ионов металлов в воде.

Ожидаемые результаты

Результатом проекта является научно-техническая база для получения новых классов конструируемых, функционализированных и гибридных ТМ, созданных в ходе теоретических и экспериментальных исследований. В зависимости от этого значения основных (научных/научно-технических) характеристик результатов работы формулируются так, как описано ниже.

Важным ожидаемым результатом работы должны стать лабораторные методы получения инженерных или нано- и микроструктурированных ТМ повышенной проницаемости по отношению к водным растворам веществ для баро- и электромембранных процессов. Полученные данным методом экспериментальные образцы мембран после селективной функционализации будут применяться для перспективных разделительных мембран, биомиметических мембран и сенсоров.

Основные результаты выполнения проекта могут вкратце быть сформулированы следующим образом:

- 1) Экспериментальные результаты о возможности изготовления нанокompозитных, функционализированных и гибридных ТМ для процессов разделения, нанофлюидики, медицинского, биохимического и сенсорного применения:
 - функционализированные ТМ, полученные из облученных ионами полимерных пленок с использованием мягкого фотолиза и жидкостной экстракции продуктов деградации из треков для электробаромембранного процесса;

- ТМ с асимметричными нанопорами, модифицированные методом карбодиимид-опосредованного соединения для разделения рацемических смесей на отдельные энантиомеры;
 - микрофльтрационные ТМ с белками, иммобилизованными посредством адсорбции, ковалентной связи и специфического распознавания (сродства), для обнаружения РНК и ДНК и применения в биосенсорах;
 - нанопористые мембраны ПВДФ модифицированные путем радиационной прививки функциональных мономеров для селективного предварительного концентрирования токсичных металлов из водных растворов и их количественного определения методом инверсионной вольтамперометрии;
 - ТМ, функционализированные путем послойной сборки наночастиц серебра и биосовместимых наноконъюгатов в качестве бактериоцидных и вирусоцидных материалов;
 - химически модифицированные ультра- и микрофльтрационные ТМ для блоттинга белков;
 - химически модифицированные ТМ с улучшенной клеточной адгезией для биореакторов;
 - аффинные ультра- и микрофльтрационные ТМ для захвата и разделения экзосом;
 - нанокompозитные ТМ, модифицированные иммобилизованными наночастицами серебра и золота с аптамерами, для быстрого и чувствительного обнаружения вирусологических заболеваний с помощью SERS и флуоресцентной спектроскопии;
 - гибридные ТМ с поверхностными полимерными нановолоконными структурами, образованными методом электроформования, модифицированными селективными комплексными соединениями, лигандами и металлоорганическими каркасами для селективного удаления коллоидных и ионных форм токсичных металлов из воды.
- 2) Определение ионоселективных свойств функционализированных мембран, полученных из облученного полимера, с помощью мягкого фотолиза и жидкостной экстракции продуктов деградации из треков. Исследование возможности разделения моно- и многовалентных ионов на нанопористых ТМ с использованием электро-баромембранного процесса.
- 3) Данные об ионоселективных, электрокинетических и осмотических свойствах привитых нанопор, включая асимметричные нанопоры, в зависимости от геометрии пор и функциональных групп.

Риски

Для успешной реализации Проекта и снижения рисков ЛЯР располагает необходимым научным оборудованием, установками, экспериментальными методиками и человеческими ресурсами. Предпосылкой для успешного выполнения работ и снижения инвестиционных рисков является наличие у ЛЯР положительных результатов предыдущих фундаментальных и прикладных исследований. Сотрудники ЛЯР являются всемирно известными специалистами и экспертами в данной предметной области с публикациями в научных журналах с высоким импакт-фактором.

Для успешной реализации целей и задач Проекта целесообразно привлечение специалистов в различных областях знаний, особенно в области технологии биологических продуктов высокой чистоты и молекулярной биологии. К серьезным рискам Проекта можно отнести следующие факторы:

1. отклонение от графика пусконаладочных работ на циклотроне ДЦ-140;
2. выход из строя и ремонт важнейшего аналитического оборудования;
3. проблемы с заказом реагентов.

Список литературы

1. P. Apel. (2001) Track etching technique in membrane technology. Radiation Measurements, Volume 34, pp. 559-566.
2. P.Y.Apel, S.N.Dmitriev, (2011). Micro- and nanoporous materials produced using accelerated heavy ion beams. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology 2(1), 013002. doi:10.1088/2043-6262/2/1/0130021
3. Ma, T., Janot, J., & Balme, S. (2020).Track Etched Nanopore/Membrane: From Fundamental to Applications. Small Methods 4, 2000366. doi:10.1002/smt.202000366
4. P.Y. Apel. (2019) Fabrication of functional nano- and microporous materials from polymers modified with swift heavy ions. Radiat. Phys. Chem. 159 25-34. doi 10.1016/j.radphyschem.2019.01.009
5. P. Yu Apel, I.V. Blonskaya, O.M. Ivanov, O.V. Kristavchuk, A.N. Nechaev, K. Olejniczak, O.L. Orelovich, O.A. Polezhaeva, S.N. Dmitriev. Do the soft-etched and UV-track membranes actually have uniform cylindrical subnanometer channels? Radiat. Phys. Chem., Volume 198, 2022, 110266.
6. D. Yu. Butylskii, N.D. Pismenskaya, P. Yu. Apel at al. (2021) Highly selective separation of singly charged cations by countercurrent electromigration with a track-etched membrane, J. Membr.Sci., Volume 635, 119449, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119449>.
7. Kaya, D., & Keçeci, K. (2020). Review—Track-Etched Nanoporous Polymer Membranes as Sensors: A Review. Journal of Electrochemical Society, 167(3), 037543. doi:10.1149/1945-7111/ab67a7
8. Kukushkin V., Kristavchuk O., Andreev E. at al. (2023).Aptamer-coated track-etched membranes with a nanostructured silver layer for single virus detection in biological fluids Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, doi 10.3389/fbioe.2022.1076749
9. Kumara S., Munaweera I. and Kottegodal N. (2022) A comprehensive review on electrospun nanohybrid membranes for wastewater treatment Beilstein J. Nanotechnol. 13, 137–159. <https://doi.org/10.3762/bjnano.13.10>

2.3. Предполагаемый срок выполнения

Декабрь 2028

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка,
Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова,
Лаборатория радиационной биологии

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ)					
- EOS	-	-	-	-	-
- Ленты					
Tier 1 (ядро-час)	-	-	-	-	-
Tier 2 (ядро-час)	-	-	-	-	-
СК «Говорун» (ядро-час)					
- CPU	-	-	-	-	-
- GPU					
Облака (CPU ядер)	-	-	-	-	-

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
Ереванский государственный университет	Армения	Ереван	А. Саркисян, Р. Арутюнян Т. Харутюнян	Совместные работы
Институт молекулярной биологии	Армения	Ереван	Г. Закарян	Совместные работы
Институт химической физики им. Налбандяна	Армения	Ереван	О. Камалян	Совместные работы
Австралийский национальный университет	Австралия	Канберра	П. Клут, С. Датт	Совместные работы
Институт физико-органической химии НАН Беларуси	Беларусь	Минск	А. Бильдюкевич	Соглашение
Гомельский Государственный Университет имени Ф. Скорины	Беларусь	Гомель	А. Рогачев	Соглашение
Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России	Россия	Москва	А. Осипов	Совместные работы
Российский университет дружбы народов	Россия	Москва	А. Люндуп	Совместные работы
Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова	Россия	Москва	С. Румянцев	Совместные работы
Московский физико-технический институт	Россия	Долгопрудный	С. Леонов	Совместные работы
Научно-исследовательский институт вакцин и сывороток им. И. И. Мечникова	Россия	Москва	А. Поддубиков	Совместные работы
Институт общей и неорганической	Россия	Москва	А. Ярославцев	Совместные работы

химии				
Институт нефтехимического синтеза	Россия	Москва	В. Волков	Совместные работы
Кубанский государственный университет	Россия	Краснодар	В. Никоненко	Совместные работы
Московский государственный университет	Россия	Москва	Е. Завьялова	Совместные работы
Институт физики твердого тела РАН	Россия	Черноголовка	В. Кукушкин	Совместные работы
Ивановский государственный химико-технологический университет	Россия	Иваново	В. Горберг	Совместные работы
Институт синтетических полимерных материалов им. Ениколопова	Россия	Москва	А. Гилман	Совместные работы
Университет имени Нельсона Манделы	Южная Африка	Порт-Элизабет	А. Огунладжа	Совместные работы
Университет Квазулу Натал	Южная Африка	Дурбан	Ф. Хоза	Совместные работы
Университет Претории	Южная Африка	Претория	Н. Номбона	Совместные работы
Университет Уолтера Сисулу	Южная Африка	Мтхата	Н. Фалени	Совместные работы
Университет Западного Кейпа	Южная Африка	Кейптаун	Л. Петрик	Совместные работы

2.6. Организации-соисполнители

нет

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	12,5	0
2.	инженеры	9	0
3.	специалисты	2	0
4.	служащие	0	0
5.	рабочие	2	0
	Итого:	25,5	0

3.2. Доступные кадровые ресурсы

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники				
1.1.		Павел Апель	Центр прикладной физики	Начальник Центра	0,5
1.2.		Александр Нечаев	Центр прикладной физики	Заместитель начальника центра по научной работе	1
1.3.		Вера Ширкова	Центр прикладной физики	Начальник группы	1
1.4.		Андреян Осипов	Центр прикладной физики	Ведущий научный сотрудник	0,5
1.5.		Сергей Румянцев	Центр прикладной физики	Ведущий научный сотрудник	0,5
1.6.		Алексей Люндуп	Центр прикладной физики	Старший научный сотрудник	0,5
1.7.		Дмитрий Мурашко	Центр прикладной физики	Старший научный сотрудник	0,5
1.8.		Любовь Кравец	Центр прикладной физики	Старший научный сотрудник	1
1.9.		Людмила Молоканова	Центр прикладной физики	Научный сотрудник	1
1.10.		Ольга Криставчук	Центр прикладной физики	Научный сотрудник	1
1.11.		Ульяна Пинаева	Центр прикладной физики	Научный сотрудник	1
1.12.		Ирина Фадейкина	Центр прикладной физики	Научный сотрудник	0,5
1.13.		Генрих Серпионов	Центр прикладной физики	Научный сотрудник	1
1.14.		Владимир Алтынов	Центр прикладной физики	Научный сотрудник	0,5
1.15.		Арно Руссоу	Сектор №8	Научный сотрудник	1
1.16.		Евгений	Центр	Младший	1

		Андреев	прикладной физики	научный сотрудник	
2.	инженеры				
2.1.		Дмитрий Щеголев	Центр прикладной физики	Заместитель начальника центра по технологиям	1
2.2.		Олег Иванов	Центр прикладной физики	Начальник группы	0,5
2.3.		Олег Орелович	Центр прикладной физики	Начальник группы	0,5
2.4.		Ирина Блонская	Центр прикладной физики	Старший инженер	1
2.5.		Николай Лизунов	Центр прикладной физики	Старший инженер	0,5
2.6.		Илья Виноградов	Центр прикладной физики	Инженер	1
2.7.		Ольга Полежаева	Центр прикладной физики	Инженер	1
2.8.		Мария Кувайцева	Центр прикладной физики	Инженер	1
2.9.		Алексей Маркин	Центр прикладной физики	Инженер	0,5
2.10.		Сергей Митюхин	Центр прикладной физики	Инженер	1
2.11.		Розанна Рагимова	Центр прикладной физики	Инженер	1
3.	специалисты				
3.1.		Наталья Кузьмина	Центр прикладной физики	Начальник группы	0,5
3.2.		Ирина Дукач	Центр прикладной физики	Ведущий специалист по работе с документами	0,5
3.3.		Елена Нестерова	Центр прикладной физики	Специалист	1
4.	рабочие				
4.1.		Дарья Никольская	Центр прикладной физики	Техник	1

4.2.		Галина Волнухина	Центр прикладной физики	Лаборант химико-технологических исследований	0,2
4.3.		Оксана Донникова	Центр прикладной физики	Лаборант химико-технологических исследований	0,2
4.4.		Ирина Мятлева	Центр прикладной физики	Лаборант химико-технологических исследований	0,2
4.5.		Елена Филатова	Центр прикладной физики	Лаборант химико-технологических исследований	0,2
4.6.		Ирина Шамшиддинова	Центр прикладной физики	Лаборант химико-технологических исследований	0,2
		Итого:			25,5

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники	-	-
2.	инженеры	-	-
3.	специалисты	-	-
4.	рабочие	-	-
	Итого:	-	-

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП). Детализация приводится в отдельной форме.

2 275 000 \$.

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков — общий объем.

0 \$.

Руководитель проекта _____/_____ /

Дата представления проекта в ДНОД _____

Дата решения НТС Лаборатории _____, номер документа _____

Год начала проекта 2024

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления
Проекта / Подпроекта КИП**

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования		Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Стоимость, распределение по годам					
			1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	
	Международное сотрудничество (МНТС)	100	20	20	20	20	20	
	Материалы	150	30	30	30	30	30	
	Оборудование и услуги сторонних организаций (пуско-наладочные работы)	1400	280	280	280	280	280	
	Пуско-наладочные работы	0	0	0	0	0	0	
	Услуги научно- исследовательских организаций	250	50	50	50	50	50	
	Приобретение программного обеспечения	75	15	15	15	15	15	
	Проектирование/строительство	300	50	55	60	65	70	
	Сервисные расходы (<i>планируются в случае прямой принадлежности к проекту</i>)	0	0	0	0	0	0	
Необходимые ресурсы	Нормо-час	Ресурсы						
		- сумма FTE,	25,5	25,5	25,5	25,5	25,5	
		- ускорителя/установки,	1250	250	250	250	250	
		- реактора,.....	0	0	0	0	0	
Источники финансирования	Бюджетные средства	Бюджет ОИЯИ (<i>статьи бюджета</i>)	2275	445	450	455	460	465
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования	0	0	0	0	0	0

Руководитель проекта _____ / _____ /

Экономист Лаборатории _____ / _____ /

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА

ШИФР ПРОЕКТА

ШИФР ТЕМЫ

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИНСТИТУТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ПОДПИСЬ

ФИО

ДАТА