

КЛИНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ЭНДОПРОТЕЗОВ С НАФИОНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ В ПЛАСТИКЕ ПОСЛЕОПЕРАЦИОННЫХ ВЕНТРАЛЬНЫХ ГРЫЖ

Кудусов К.М.¹, Ваганов А.Г.¹, Асланов А.Д.¹, Магамадов А.Х.²

¹*Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик, e-mail: aleksejvaganov4@gmail.com;*

²*ФГБУН «Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН», Грозный*

В настоящее время поиск новых материалов для герниопластики является актуальной задачей современной хирургии. Цель - оценка эффективности герниопластики с использованием полипропиленового эндопротеза с нафионовым покрытием. В исследовании участвовало 55 пациентов, оперированных в объеме герниопластики сетчатым эндопротезом. Место проведения - хирургическое отделение № 2 Республиканской клинической больницы г. Нальчика. Основной группе (n=25) выполняли ретромускулярную протезирующую пластику сеткой с нанесенным на ее поверхность нафионом. Контрольной группе (n=30) выполнялась традиционная герниопластика. Перед операцией пациенты были обследованы и имели низкие анестезиологические риски. После операции отслеживались гнойные осложнения, объем лимфорей. Для статистической обработки данных было использовано программное обеспечение SPSS Statistics 17.0. У 4 (13,3%) пациентов в контрольной группе и у 2 (8,0%) в основной отмечено нагноение послеоперационной раны при нахождении в стационаре. Площадь нагноения в основной группе составила $25,8 \pm 1,4$ см², а в контрольной - $51,2 \pm 1,9$ см² (p=0,001). При визуальном осмотре гнойной полости наибольшие изменения в основной группе наблюдались в подкожно-жировой клетчатке, в группе контроля - в мышечно-апоневротическом слое. Сроки заживления были больше в группе контроля. На 3-и сутки объем лимфорей был больше в контрольной группе. На 10-40-е сутки остаточный объем жидкостного скопления в надапоневротическом пространстве при динамическом ультразвуковом исследовании был больше в контрольной группе. Применение герниопластики с использованием покрытия из нафиона приводит к статистически значимому снижению гнойных послеоперационных осложнений и объема лимфорей.

Ключевые слова: послеоперационная вентральная грыжа, нафион, ионообменная мембрана, герниопластика, полипропиленовый эндопротез, гнойная рана, планиметрический метод.

CLINICAL STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF POLYPROPYLENE ENDOPROSTHESES WITH NAFION COATING IN PLASTIC SURGERY OF POSTOPERATIVE VENTRAL HERNIAS

Kudusov K.M.¹, Vaganov A.G.¹, Aslanov A.D.¹, Magamadov A.H.²

¹*Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, e-mail: aleksejvaganov4@gmail.com;*

²*Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov RAS, Grozny*

Currently, the search for new materials for hernioplasty is an urgent task of modern surgery. The aim is to evaluate the effectiveness of hernioplasty using a nafion-coated polypropylenic endoprosthesis. The study involved 55 patients who underwent hernioplasty with a mesh endoprosthesis. The venue is surgical department no.2 Republican Clinical Hospital of Nalchik. The main group (n=25) underwent retromuscular prosthetic plastic surgery with a mesh with a nafion applied to its surface. The control group (n=30) underwent traditional hernioplasty. Before the operation, the patients were examined and assessed for low anesthetic risks. Purulent complications and the volume of lymphorrhea were monitored after the operation. The SPSS Statistics 17.0 software was used for statistical data processing. 4 (13,3%) patients in the control group and 2 (8,0%) in the main group had postoperative wound suppuration during hospital stay. The area of suppuration in the main group was 25.8 ± 1.4 cm², and in the control group - 51.2 ± 1.9 cm² (p=0,001). Upon visual examination of the purulent cavity, the greatest changes in the main group were observed in subcutaneous fat, in the control group - in the muscular-aponeurotic layer. The healing time was longer in the control group. From day 3, the volume of lymphorrhea was greater in the control group. On days 10-40, the residual volume of fluid accumulation in the supra-aponeurotic space during dynamic ultrasound examination was greater in the control group. The use of hernioplasty using nafion coating leads to a statistically significant reduction in purulent postoperative complications and lymphorrhea volume.

Keywords: postoperative ventral hernia, nafion, ion exchange membrane, hernioplasty, polypropylene endoprosthesis, purulent wound, planimetric method.

Введение. В настоящее время, несмотря на внедрение новых техник герниопластики и различных протезирующих материалов, лечение послеоперационных вентральных грыж является сложной задачей. По данным литературы, в 20-63% случаев наступают рецидивы заболевания [1]. До сих пор отсутствует единая хирургическая тактика при выборе того или иного метода герниопластики [2]. Кроме того, активно ведётся поиск новых материалов, обладающих биосовместимостью и инертностью [3; 4]. Важным остаётся вопрос индивидуального подбора того или иного вида биопротеза в зависимости от возраста пациента, состояния тканей передней брюшной стенки, наличия сопутствующей патологии и метаболических расстройств [5; 6]. Нерешенными до конца остаются вопросы протезирования передней брюшной стенки при гигантских послеоперационных вентральных грыжах у лиц с сопутствующим ожирением либо пожилого и старческого возраста [7]. Квалификация хирургической бригады и оснащение клиники в условиях отсутствия унифицированных требований в выполнении того или иного вмешательства являются ключевыми моментами успеха операции [8]. В настоящее время интересным представляется использование в различных медицинских сферах ионообменных мембран, в частности нафиона. Последний представляет собой сульфонированный фторполимер, способный менять свои свойства при контакте с обычной водой, богатой дейтерием. В результате набухания и разматывания нафиона в различных жидкостях формируется нанослой шириной 20-30 мкм, представляющий собой многочисленные ворсинки [9]. Данная искусственная мембрана представляет собой амфифильную структуру, гидрофобные концы которой обращены внутрь (перфторуглеродные группы), а гидрофильные – снаружи (сульфонированные группы). Эта структура является прототипом биологической мембраны, а «щеточная кайма», образуемая вследствие набухания нафиона, прототипом гликокаликса [10]. В настоящее время изучается возможность использования данной мембраны в тканевой инженерии в качестве каркаса для роста клеток и матрицы для образования новых тканей. Данная возможность обусловлена высокой биологической совместимостью нафиона, его уникальными ионообменными свойствами, высокой химической и термической устойчивостью. Кроме того, данное вещество используется в создании «умных повязок», систем доставки лекарств и новых типов диагностических платформ [11]. Нафион увеличивает процессы адгезии, фиброза, а его гидрофильная сульфонированная группа обладает хорошей бактерицидной активностью ввиду закисления окружающей среды [12].

Цель исследования - оценка эффективности герниопластики с использованием полипропиленового эндопротеза с нафионовым покрытием.

Материалы и методы исследования

Данное клиническое исследование явилось итогом внедрения результатов эксперимента по изучению результатов имплантации полипропиленового эндопротеза с нафионовым покрытием, который был проведен на кроликах в условиях экспериментального вивария Кабардино-Балкарского университета. Гистологически было доказано, что модификация полипропиленовых эндопротезов нафионом у животных приводила к повышению их биосовместимости, снижению воспалительной тканевой реакции и усилению процессов фибриллогенеза в зоне имплантации. Результаты экспериментальной работы находятся на этапе опубликования.

Проведенное клиническое исследование было прямым и проспективным. Рандомизация к распределению участников исследования применена не была. Объектом изучения явились 55 пациентов. Все они перенесли операцию: «Герниопластика послеоперационной вентральной грыжи сетчатым эндопротезом». Грыжевые выпячивания имели различные локализации и размеры. Все пациенты проходили лечение в хирургическом отделении № 2 Республиканской клинической больницы г. Нальчика в период с 2020 по 2025 г. По особенностям проведения операции было выделено 2 группы.

Основная группа (25 человек) - пациенты, которым выполнялась ретромускулярная герниопластика с использованием полипропиленового эндопротеза «Эсфил» с нанесенной на его поверхность нафионовой мембраной.

Контрольная группа (30 человек) - пациенты, которым выполнялась ретромускулярная герниопластика с использованием обычного полипропиленового эндопротеза «Эсфил».

Критерием включения пациентов в исследование являлся размер грыжи W1-W2 (по классификации Европейского герниологического общества - EHS). Локализация послеоперационных вентральных грыж представлена в таблице 1.

Таблица 1

Локализация грыжевых выпячиваний в группах

Локализация	EHS	Основная группа (%)	Контрольная группа (%)
Срединная	Субксифоидальная – M1	1 (4,0)	1 (3,33)
	Эпигастральная – M2	1 (4,0)	1 (3,33)
	Пупочная – M3	11 (44,0)	18 (60,0)
	Инфраумбиликальная – M4	8 (32,0)	7 (23,33)
	Надлобковая – M5	0	0
Латеральная	Подреберная – L1	1 (4,0)	0

	Боковая – L2	1 (4,0)	1 (3,33)
	Подвздошная – L3	2 (8,0)	2 (6,7)
	Поясничная – L4	0	0

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Средний возраст пациентов составил $54,2 \pm 4,1$ года. Мужчин было 16 (29,1%), женщин - 39 (70,9%). По сопутствующей патологии группы были компенсированы и сопоставимы. Срок наблюдения составил 6 месяцев. Первичная конечная точка исследования - завершение исследования. Вторичная конечная точка исследования - нагноение послеоперационной раны.

Перед операцией пациенты были амбулаторно обследованы в стандартном предоперационном объеме. Нанесение ионообменной мембраны на поверхность сетки проводилось путем замачивания последней в ламинарном боксе (II степень защиты от возможного бактериального обсеменения), непосредственно с началом операции, в 5%-ном спиртовом растворе нафциона, с дальнейшим высушиванием в течение 15 минут. В результате на поверхности сетки и в ее порах формировалась тонкая пленка ионообменной мембраны. Полипропиленовые сетки «Эсфил», которые имплантировались в переднюю брюшную стенку, находились в стерильной заводской упаковке. Использование данных эндопротезов в процессе операции проводили с соблюдением правил асептики и антисептики.

Операция с использованием полипропиленового эндопротеза с нафионовым покрытием проводилась после подписания пациентами письменного добровольного информированного согласия на операцию в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (2004). Работа одобрена локальным этическим комитетом Кабардино-Балкарского университета им Х.М. Бербекова № 2 от 30.01.2020.

После операции проводился клиничко-лабораторный мониторинг состояния послеоперационных больных, характерный для хирургического стационара и включающий динамическое измерение температуры тела, контроль клинического и биохимического анализа крови. После операции в процессе исследования определялось количество нагноений, с проведением бактериологического исследования послеоперационной раны. Площадь гнойных ран определялась по методу Л.И. Поповой. Суть данного метода - определение площади раны путем создания ее трафарета на полиэтилене. В дальнейшем подсчет площади выполнялся с использованием миллиметровой бумаги с нанесенным на ее поверхность полиэтиленовым контуром раны. Определялось количество отделяемого по дренажам Редона, а также учитывалась скорость их удаления. В послеоперационном периоде выполнялось ультразвуковое исследование мягких тканей для определения объема серозного жидкостного скопления над апоневрозом.

Для статистической обработки данных при сравнении групп исследования было использовано программное обеспечение SPSS Statistics 17.0. Была создана шкала среднеарифметических значений изучаемых признаков (mean), а также их стандартное отклонение (SD). При этом χ^2 тест оценивал гетерогенность групп. Т-критерий Стьюдента был использован для оценки статистической значимости различий средних значений. Данный критерий считали статистически значимым при $p < 0,05$. В случае малых выборок статистически значимые отклонения оценивали с использованием U-критерий Манна - Уитни.

Результаты исследования и их обсуждение. Операции прошли успешно у всех респондентов. Отмечалась сопоставимость площади имплантируемого полипропиленового эндопротеза (в основной группе $35,6 \pm 10,2 \text{ см}^2$, а в группе контроля – $31,4 \pm 11,2 \text{ см}^2$; при $p=0,132$).

На 5-7-е сутки исследования у респондентов отмечено формирование системной воспалительной реакции (ССВР), которая проявилась в ряде лабораторных изменений. Однако степень выраженности ССВР в группах была различной. При оценке лабораторной динамики на 5-е сутки выявлены статистически значимые отличия.

Таблица 2

Напряженность системной воспалительной реакции в группах исследования

Группа исследования	Основная группа (n=25)			Группа контроля (n=30)		
	5-е сутки	7-е сутки	9-е сутки	5-е сутки	7-е сутки	9-е сутки
Сроки после операции						
Лейкоцитоз, г/л	12,3±1,1	14,1±4,1	10,3±6,1	17,2±1,9*	19,8±1,9*	16,6±3,1*
СРБ, Е/л	215,1±11,8	298,1±18,6	197,6±14,4	305,2±10,7*	376,1±19,8*	275,1±14,3*
Прокальцетонин	0,05±0,01	0,35±0,02	0,24±0,03	0,09±0,02	1,25±0,06*	0,87±0,11*

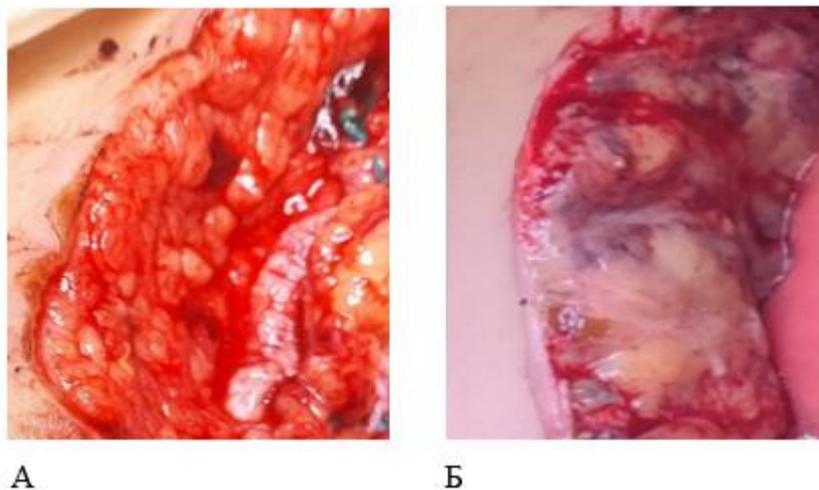
Примечание: * - различия между группами статистически значимы ($p < 0,05$).

Составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

С целью выяснения генеза температуры всем пациентам в условиях перевязочной выполнена ревизия послеоперационной раны. На перевязке у 4 (13,3%) лихорадящих пациентов в контрольной группе и у 2 (8,0%) в основной получен гной. Гнойных осложнений у других участников исследования за период лечения в стационаре выявлено не было.

Измеренная планиметрическим методом площадь гнойной раны, сформированной после хирургической обработки, к 10-м суткам исследования составила в основной группе $25,8 \pm 1,4 \text{ см}^2$, а в контрольной - $51,2 \pm 1,9 \text{ см}^2$, при $p=0,001$.

При визуальном осмотре гнойной полости наибольшие изменения в основной группе наблюдались в подкожно-жировой клетчатке. В ней отмечались выраженная инфильтрация, гнойное пропитывание и участки некрозов (рис.).



Макроскопический вид гнойных осложнений в группах сравнения:

А – основная группа (участок некроза апоневроза в месте имплантации эндопротеза, подкожная клетчатка изменена вторично),

Б – первичный характер гнойно-некротических изменений в контрольной группе

Данная макроскопическая картина подчеркивала первичный характер изменений в подкожной клетчатке со вторичным их распространением на область полипропиленового эндопротеза. В контрольной группе гнойно-некротические изменения были более выражены в области мышечно-апоневротического слоя, в месте имплантации полипропиленового эндопротеза. Подкожно-жировая клетчатка была изменена вторично. При бактериологическом анализе на поверхности полипропиленового эндопротеза и в подкожно-жировой клетчатке в основной группе отмечено отсутствие синегнойной палочки, которая была обнаружена у респондентов группы контроля. В остальном микробный пейзаж в группах исследования был сопоставим (табл. 3).

Таблица 3

Результаты посевов с поверхности послеоперационной раны в сравниваемых группах

Вид бактерии	Группы исследования	
	Основная (КОЕ)	Контрольная (КОЕ)
Staphylococcus epidermidis	10^6	10^6
Staphylococcus aureus	10^6	10^6
Staphylococcus xylosus	10^3	10^2

Escherichia coli	10 ⁴	10 ³
Proteus mirabilis	10 ³	10 ⁴
Acinetobacter spp	10 ³	10 ⁴
Citrobacter freundii	10 ²	10 ³
Pseudomonas aeruginosa	-	10 ²

Примечание: указано максимальное количество колониобразующих единиц (КОЕ), высеванное у участников групп сравнения.

Составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Необходимо отметить, что 1 человеку в группе контроля, ввиду нагноения, пришлось демонтировать полипропиленовый эндопротез. В остальных случаях на фоне проводимой антибактериальной терапии и местного лечения отмечалась положительная динамика в течении раневого процесса. Заживление раны в основной группе наступило через 14,4±3,2 дня, в контрольной - 23,5±2,1 дня, при p=0,033.

Лимфорея после операции отмечалась у всех респондентов. Количество серозной жидкости по пассивному дренажу Редона (V) с 3-х суток в группах исследования отличалось, причем его было статистически значимо больше в контрольной группе (3-и сутки исследования – V (основ.)= 70,4±10,3 мл, V (контроль)= 120,2±11,4 мл; при p=0,037).

В группе контроля удаление дренажей из подкожной клетчатки выполнялось через 9,3±1,1 дня, а в основной группе - 6,3±1,4 дня. Критерием для удаления дренажа из подкожной клетчатки являлось отделяемое по дренажу менее 100 мл в суточном дебете. Данные различия были статистически значимы (p=0,024). Динамическое ультразвуковое сканирование подкожной клетчатки осуществлялось всем участникам исследования в амбулаторных условиях, после выписки пациентов из стационара (10-40-е сутки послеоперационного периода) выявили статистически значимые различия в объеме жидкостного скопления над апоневрозом (табл. 4).

Таблица 4

Результаты ультразвукового исследования мягких тканей в динамике

Время проведения УЗ-исследования	Объем жидкостного скопления в подкожной клетчатке		
	Основная группа, мл	Контрольная группа, мл	p
20-е сутки	31,2±11,2	90,4±17,2	0,008
30-е сутки	19,8±5,1	65,4±15,7	0,004
40-е сутки	11,3±2,2	43,1±11,8	0,001

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

У ряда исследуемых пациентов гнойные осложнения манифестировали уже после выписки (у 2 (8,0%) пациентов из основной группы и у 5 (16,7%) - из контрольной). Все больные были госпитализированы в отделение гнойной хирургии, при этом 1 (4,0%) человеку в основной группе и 4 (13,3%) – в контрольной, помимо вскрытия гнойника и санации подкожной клетчатки, удалена ранее установленная сетка. Рецидива грыжевых выпячиваний в течение 6 месяцев проведения исследования зафиксировано не было.

По результатам проведенного исследования выявлены определенные преимущества использования нафионового покрытия в полипропиленовых эндопротезах, используемых при пластике послеоперационных вентральных грыж. У пациентов, которым применялось нафионовое покрытие, статистически значимо снизилось количество гнойных раневых осложнений. Более того, в основной группе выявлен совершенно иной механизм формирования нагноений, заключающийся в первоначальном инфицировании кожи и подкожной клетчатки с последующим распространением на область полипропиленовой сетки. В контрольной группе – нагноение из области контакта полипропиленовой сетки с мышечно-апоневротическим слоем носило первичный характер, с последующим распространением на подкожно-жировой слой и кожу. Микробиологический анализ отделяемого из раны выявил более патогенную флору в группе контроля. Нафион обладает низкой токсичностью и хорошо переносится биологическими тканями, что делает его подходящим материалом для создания покрытий для имплантов и медицинских сенсоров. Покрытия из нафиона могут снижать образование биоплёнок и уменьшать риск воспалительных реакций вокруг медицинских имплантов. Его отрицательно заряженные сульфогруппы закисляют среду, обладая хорошим бактерицидным эффектом [12]. Кроме того, его мицеллярная структура способствует удержанию различных белков, ферментов и даже митохондрий, предотвращая их вымывание и обеспечивая функциональную полноценность при снижении pH [13]. Это обстоятельство является частным примером селективной проницаемости мембраны для ионов и малых молекул. Кроме того, ряд последних исследований утверждает возможность тонкой настройки данного параметра мембраны, например при воздействии слабого электромагнитного излучения [14]. Все вышеописанные свойства приводят к улучшению регенерационных свойств тканей при имплантации различных материалов с нафионовым покрытием. Более того, нафион является, по сути, структурным матриксом, по которому происходит образование новых тканей [15]. Ввиду усиления адгезионных свойств данной ионообменной мембраной, происходит быстрое уменьшение искусственной ретромускулярной полости со снижением объема лимфорей, что было доказано проведенным исследованием.

Заключение

Применение герниопластики с использованием покрытия из нафiona приводит к статистически значимому снижению гнойных послеоперационных осложнений, а также к снижению объема лимфоци.

Список литературы

1. Лукоянычев Е.Е., Измайлов С.Г., Емельянов В.А., Колчина О.С., Ротков А.И., Киселёв М.Н. Общий взгляд на технологии профилактики и лечения пациентов с послеоперационными вентральными грыжами. Исследования и практика в медицине. 2021; 8(3): 84-96. DOI: 10.17709/2410-1893-2021-8-3-8.
2. Wang M, Chen W, Chu X. Comparative analysis of efficacy and quality of life between totally extraperitoneal sublay and intraperitoneal onlay mesh repair for ventral hernia. Sci Rep. 2025 Jan 25; 15(1):3179. DOI: 10.1038/s41598-025-87555-x
3. Gismalla MD, Ibrahim MMA, Mahmoud MA, Alamalhuda AAH. Effectiveness of topical gentamicin in preventing surgical site infections during hernia mesh repair: experience from developing countries. Hernia. 2025;29(1):184. DOI: 10.1007/s10029-025-03372-1.8.
4. Bhardwaj P, Huayllani MT, Olson MA, Janis JE. Year-Over-Year Ventral Hernia Recurrence Rates and Risk Factors. JAMA Surg. 2024 Jun 1;159(6):651-658. DOI: 10.1001/jamasurg.2024.0233.
5. Кулиев С.А., Протасов А.В., Коссович М.А. Факторы риска, влияющие на развитие осложнений у пациентов с гигантскими послеоперационными вентральными грыжами. Клиническая и экспериментальная хирургия. Журн. им. акад. Б.В. Петровского. 2020; 8(1): 7-11. DOI: 10.33029/2308-1198-2020-8-1-7-11
6. Henriksen NA, Bougard H, Gonçalves MR, Hope W, Khare R, Shao J, et al. Primary ventral and incisional hernias: comprehensive review. BJS Open. 2024;9(1):zrae145. DOI: 10.1093/bjsopen/zrae145.
7. Elhadidi A, Shetiwy M, Al-Katary M. Comparative analysis of laparoscopic, retro-muscular, and open mesh repair techniques for ventral and incisional hernias: a comprehensive review and meta-analysis. Updates Surg. 2025;77(1):217-229. DOI: 10.1007/s13304-024-02049-1.
8. Fernandez-Moure JS, Van Eps JL, Scherba JC, Yazdi IK, Robbins A, Cabrera F, et al. Platelet-rich plasma enhances mechanical strength of strattice in rat model of ventral hernia repair. J Tissue Eng Regen Med. 2021; 15(7):634-647. DOI: 10.1002/term.3200.
9. Ninham BW, Battye MJ, Bolotskova PN, Gerasimov RY, Kozlov VA, Bunkin NF. Nafion: New and Old Insights into Structure and Function. Polymers (Basel). 2023; 15(9):2214. DOI: 10.3390/polym15092214.

10. Bunkin NF, Bolotskova PN, Gudkov SV, Khuong MT, Kozlov VA, Timchenko SL, Voronov VV, Novakovskaya YV. Nafion: A Flexible Template for Selective Structuring. *Polymers (Basel)*. 2024;16(6):744. DOI: 10.3390/polym16060744.
11. Bunkin NF, Gorelik VS, Kozlov VA, Shkirin AV, Suyazov NV. Colloidal crystal formation at the "Nafion-water" interface. *J Phys Chem B*. 2014; 118(12):3372-7. DOI: 10.1021/jp4100729.
12. Choi JS, Smith AST, Williams NP, Matsubara T, Choi M, Kim JW, Kim HJ, Choi S, Kim DH. Nanopatterned Nafion microelectrode arrays for *in vitro* cardiac electrophysiology. *Adv Funct Mater*. 2020 Jun 18; 30(25):1910660. DOI: 10.1002/adfm.201910660.
13. Huldin GF, Huang J, Reitemeier J, Fu KX. Nafion coated nanopore electrode for improving electrochemical aptamer-based biosensing. *Faraday Discuss*. 2025;257(0):316-332. DOI: 10.1039/d4fd00144c.
14. Yu L, Gao H, Zhang N, Zhang XM. Symmetry related proton conductivity tunability via aliovalent metal substitution in imidazolium templated stable metal-organic framework hybrid membranes. *J Colloid Interface Sci*. 2025; 680(Pt A):25-32. DOI: 10.1016/j.jcis.2024.10.169.
15. Gao Y, Guo W, Wei Q, Wang R, Liu Y, Han F, Wei F. High-performance formaldehyde electrochemical sensor utilizing Nafion as solid electrolyte for human exhaled breath detection. *Talanta*. 2025; 293:128148. DOI: 10.1016/j.talanta.2025.128148.