

Разработка нового состава антибактериального полимерного покрытия для тканого сосудистого протеза

Е. Ю. Дорошко¹, М. Л. Каплан¹, Е. Л. Артюшков¹, Н. С. Винидиктова²

¹Гомельский государственный медицинский университет, г. Гомель, Беларусь

²Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Беларусь

Резюме

Цель исследования. Разработать новый состав антибактериального полимерного покрытия для модификации тканого сосудистого протеза в эксперименте.

Материалы и методы. Экспериментально определены механическая и антибактериальная устойчивость, клеточные и тканевые реакции модифицированных тканых сосудистых протезов с гидрогелевым покрытием из поливинилового спирта, поливинилпирролидона, хитозана, гиалуроновой кислоты и антибиотика ванкомицина (1 %); образцов тканых сосудистых протезов с гидрогелевым покрытием из поливинилового спирта, поливинилпирролидона, хитозана, L-аспарагиновой кислоты и антибиотика ванкомицина (1 %); образцов тканых сосудистых протезов с гидрогелевым покрытием из поливинилового спирта, хитозана, L-аспарагиновой кислоты и антибиотика ванкомицина (1 %).

Результаты. Оценка механической устойчивости и оценка продолжительности антибактериальной устойчивости модификаций выявила, что наличие L-аспарагиновой кислоты повышает устойчивость к вымыванию ванкомицина (1 %) из поливинил-хитозанового покрытия и увеличивает продолжительность антибактериальной устойчивости протеза по сравнению с гиалуроновой кислотой с 4 до 5 суток. Оценка клеточных и тканевых реакции показала, что добавление поливинилпирролидона в покрытие на основе поливинил-хитозанового комплекса с L-аспарагиновой кислотой уменьшает трансформацию грануляционной ткани в грубоволокнистую соединительную ткань.

Заключение. Экспериментально определено, что для модификации тканых сосудистых протезов лучшим из протестированных антибактериальных полимерных покрытий является комбинация поливинилового спирта, хитозана, L-аспарагиновой кислоты после замачивания в 1%-ном растворе ванкомицина на протяжении 30 мин.

Ключевые слова: тканый сосудистый протез, полимеры, антибактериальные покрытия, эксперимент, клеточные и тканевые реакции

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в проведение поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочитали и одобрили окончательную версию для публикации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках финансируемых НИР из средств БРФФИ, гранта Президента и Инновационного фонда Гомельского областного исполнительного комитета, № госрегистрации 20192872 от 30.10.2019.

Для цитирования: Дорошко ЕЮ, Каплан МЛ, Артюшков ЕЛ, Винидиктова НС. Разработка нового состава антибактериального полимерного покрытия для тканого сосудистого протеза. Проблемы здоровья и экологии. 2025;22(1):46–52. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2025-22-2-05>

Development of a new composition of an antibacterial polymeric coating for modification of a woven vascular prosthesis

Yauheni Y. Doroshko¹, Mark L. Kaplan¹,
Evgeniy L. Artyushkov¹, Natalia S. Vinidiktova²

¹Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

²V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Abstract

Objective. To develop a new composition of an antibacterial polymeric coating for modifying a woven vascular prosthesis in an experiment.

Materials and methods. Experimentally determined mechanical and antibacterial resistance, cellular and tissue reactions of modified woven vascular prostheses with a hydrogel coating from polyvinyl alcohol, polyvinylpyrrolidone, chitosan, hyaluronic acid and the antibiotic vancomycin (1%); samples of woven vascular prostheses with a hydrogel coating from polyvinyl alcohol, polyvinylpyrrolidone, chitosan, L-aspartic acid and an antibiotic Vancomycin (1%); samples of woven vascular prostheses with a hydrogel coating of polyvinyl alcohol, chitosan, L-aspartic acid and the antibiotic Vancomycin (1%).

Results. Evaluation of mechanical stability and evaluation of duration of antibacterial resistance of modifications revealed that the presence of L-aspartic acid enhances resistance to leaching of Vancomycin (1%) from the polyvinyl chitosan coating and increases the duration of antibacterial resistance of the prosthesis compared with hyaluronic acid from 4 to 5 days. Evaluation of cellular and tissue reactions shows that the addition of polyvinylpyrrolidone into a coating based on a polyvinyl-chitosan complex with L-aspartic acid reduces the rate of transformation of granulation tissue into coarse-fibrous connective tissue.

Conclusion. It was experimentally determined that the best tested antibacterial polymeric coating for modification of woven vascular prostheses is a combination of polyvinyl alcohol, chitosan, and L-aspartic acid after soaking in a 1% solution of Vancomycin for 30 minutes.

Keywords: woven vascular prosthesis, polymers, antibacterial coatings, experiment, cellular and tissue reactions

Author contributions. All authors made significant contributions to the search and analytical work and preparation of the article, read and approved the final version for publication.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the research project funded by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and the Innovation Fund of Gomel Regional Executive Committee, State registration No. 20192872 dated 30.10.2019.

For citation: Doroshko YaY, Kaplan ML, Artyushkov EL, Vinidiktova NS. Development of a new composition of an antibacterial polymeric coating for modification of a woven vascular prosthesis. *Health and Ecology Issues*. 2025;22(1):46–52. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2025-22-2-05>

Введение

При оказании медицинской помощи с использованием медицинских устройств (имплантатов, катетеров) существует вероятность развития инфекционных осложнений после хирургического вмешательства [1]. Инфицирование синтетических сосудистых протезов после реконструктивных сосудистых вмешательств встречается с частотой до 6 % и приводит к потере конечности или летальному исходу [2–5]. При ранее проведенных нами исследованиях определено, что синтетические сосудистые протезы в аорто-подвздошно-бедренном сегменте преимущественно инфицируются контактным путем, а основными инфекционными агентами при развитии протезной инфекции являются бактерии рода *Staphylococcus* [5].

Придание антибактериальных свойств искусственным сосудистым протезам является перспективной стратегией, которая позволит сократить частоту инфекционных осложнений [6]. Имплантаты могут быть модифицированы различными веществами, например, наночастицами металлов, полимерами, гидрогелями и лекарственными средствами группы антибактериальных, например, ванкомицином (1 %) [7].

Кинетика высвобождения антибактериальных лекарственных средств из гидрогелей может быть обусловлена рядом факторов: пространственной структурой покрытия; гидрофильностью гидрогеля; наличием физико-химических и

электрических взаимодействий в структуре матрицы, вызванных существованием биоэлектретного заряда в ее компонентах [8, 9].

Недостатком гидрогелей с поливиниловым спиртом (ПВС) (нетоксичный, гидрофильный, биоразлагаемый и биосовместимый материал) является слабая способность к набуханию [10, 11]. Для решения этой проблемы в такие гидрогели вносят полисахариды и другие природные и синтетические полимеры [12, 13]. Одним из таких компонентов является хитозан, который представляет собой природный полисахарид. Он биосовместим с организмом человека, обладает собственной антибактериальной и антикоагулянтной активностью [14, 15].

Большой интерес представляет поведение гидрогелевых композиций на основе ПВС и хитозана в условиях механического контакта со средами организма. Критически важным для оптимизации и подбора новых составов антибактериальных покрытий для сосудистого протеза является оценка антибактериальной устойчивости в условиях инфицирования и изучение их биологической совместимости [16, 17].

Цель исследования

Разработать новый состав антибактериального полимерного покрытия для модификации тканого сосудистого протеза в эксперименте.

Материалы и методы

В работе исследовали гидрогелевые композиции для модифицирующих покрытий на основе ПВС и хитозана. В композициях использовали три группы вспомогательных веществ с функциональными свойствами: группа 1 — поливинилпирролидон, гиалуроновая кислота; группа 2 — поливинилпирролидон, L-аспарагиновая кислота; группа 3 — L-аспарагиновая кислота. Следует отметить, что образец сосудистого протеза без покрытия не имеет преимуществ согласно проведенным ранее исследованиям [16], а использование L-аспарагиновой кислоты связано с тем, что она принимает участие в биохимических процессах в организме человека и синтезе белка; гиалуроновая кислота принимает участие в пролиферации и миграции клеток; поливинилпирролидон способен образовывать комплексы и связывать микробные токсины [16].

Из каждой группы компонентов готовили гидрогелевую композицию, которой модифицировали тканые сосудистые протезы, которые затем высушивали. При создании образцов величина поверхностной плотности электретного заряда достигала $0,3 \text{ мкКл/м}^2$. Время замачивания всех образцов в 1%-ном растворе ванкомицина — 30 мин (по ранее проведенным исследованиям [16, 17] за это время достигается максимальное насыщение покрытий раствором антибактериального лекарственного средства).

На образцах из группы 3 были проведены испытания по изучению влияния обработки коронным разрядом на функциональные свойства модифицированных сосудистых протезов. С этой целью образцы группы 3 разделили на 2 подгруппы: подгруппа А — образцы без обработки коронным разрядом; подгруппа В — образцы после обработки коронным разрядом (поверхностная плотность электретного заряда $\sim 0,3 \text{ мкКл/м}^2$).

Для оценки устойчивости к вымыванию антимикробных свойств модифицированных гидрогелевых композиций проводилось вымывание в контейнерах с изотоническим раствором хлорида натрия. По 3 образца каждой модификации вымывали в течение 1 и 7 суток. Устойчивость к вымыванию определяли по антибактериальной активности образцов. При диско-диффузионном методе исследуемые образцы укладывали на поверхность агара Мюллера – Хинтона в чашках Петри. Измеряли размер каждого образца при 10 повторениях через 24 ч.

По оригинальной методике [16] оценивалась антибактериальная устойчивость на 80 белых крысах породы Вистар массой тела 180–250 г в

возрасте 3,5 месяца на момент начала исследования. Для двух однотипных исследуемых образцов использовалось одно лабораторное животное. Левее срединной плоскости крысы в ране длиной 2,5–3 см формировались два кармана на расстоянии не менее 1 см друг от друга. Затем в рану вводилась взвесь микробов, содержащая в 0,5–1 мл 10^9 микробных тел *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, в которую погружали по два образца. После выведения животного из эксперимента два имплантированных образца по очереди извлекались из сформированных карманов. Животных выводили на 4, 5, 6 и 7-е сутки от начала эксперимента. Метод исследования образцов — молекулярно-генетический (ПЦР). Качественный результат антибактериальной устойчивости покрытий за исследуемый период подтверждался при трех и более повторениях.

Исследование одобрено комитетом по этике УО «Гомельский государственный медицинский университет» (протокол № 2 от 30.06.2022 г.).

В экспериментальном гистологическом исследовании изучались клеточные и тканевые реакции двух модификаций (группа 2 и группа 3, подгруппа В). В эксперименте участвовало 30 крыс породы Вистар белого цвета. После имплантации двух однотипных образцов в рану на спине крысы в разные карманы, находящиеся на расстоянии не менее 1 см друг от друга, рану ушивали шелком толщиной 2,0. Как и в ранее проведенных исследованиях [17], также выводили из эксперимента по 10 животных на 5-е сутки, 14-е сутки и на 20-й неделе. Полученный материал 24 ч фиксировался в 10 %-ном растворе нейтрального формалина, после чего выполнялась заливка парафином в блоки, из которых изготавливались срезы толщиной 3–4 мкм на микротоме.

Обработка данных проводилась с использованием пакета статистических программ Statistica (StatSoft, USA), 10.0. Данные были представлены в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха (Q_1 ; Q_3). Для сравнения трех независимых групп по количественному признаку применялся Н-критерий Краскела – Уоллиса, для сравнения двух независимых групп по количественному признаку применялся U-критерий Манна – Уитни. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

На этапе определения антибактериальной активности модификаций был проведен сравнительный анализ групп (таблица 1).

Таблица 1. Антибактериальная активность модификаций тканых сосудистых протезов после механического вымывания антибиотика

Table 1. Antibacterial activity of modifications of woven vascular prostheses after mechanical leaching of the antibiotic

Группы и подгруппы исследования	Me (Q ₁ ; Q ₃), диаметр зоны подавления роста, мм		
	без вымывания	вымывание 1 сутки	вымывание 7 суток
Группа 1	21 (20; 22)	18 (18; 18)	16 (16; 16)
Группа 2	20 (19; 21)	20 (20; 20)	18 (18; 19)
Группа 3, подгруппа В	23 (22; 24)	20 (20; 20)	19 (19; 19)
Н-критерий для всех групп	40,7	60,3	69,5
р для всех групп	< 0,05	< 0,05	< 0,05

В исследуемых группах отмечена более интенсивная антибактериальная активность модификаций протезов без вымывания антибиотика у группы 3 подгруппы В, чем у групп 1 и 2, $U = 162,50$, $p < 0,05$; $U = 44,00$, $p < 0,05$ соответственно. После вымывания ванкомицина из покрытий в течение 1 суток для группы 2 и группы 3, подгруппы В отмечена статистически значимо более интенсивная антибактериальная активность, чем у группы 1, $U = 18,00$, $p < 0,05$; $U = 15,00$, $p < 0,05$ соответственно. После вымывания антибиотиков из покрытий в течение 7 суток для группы 2 и группы 3, подгруппы В отмечена статистически значимо более интенсивная антибактериальная активность, чем у группы 1, $U = 0,00$, $p < 0,05$; $U = 10,00$, $p < 0,05$ соответственно, а у группы 3, подгруппы В статистически значимо ($U = 180,00$, $p < 0,05$) лучше антибактериальная активность, чем у группы 2.

При качественной оценке продолжительности антибактериальной устойчивости модификаций тканых сосудистых протезов методами ПЦР и бактериологическим наблюдается совпадение результатов. Протезы группы 1 не инфицируются *S. aureus* до 4 суток, а протезы группы 2, группы 3 (как подгруппы А, так и подгруппы В) — до 5 суток.

Таким образом, по результатам оценки механической устойчивости к вымыванию антибиотика ванкомицин (1 %) из модификаций и оценки продолжительности антибактериальной устойчивости модификаций следует, что наличие L-аспарагиновой кислоты повышает устойчивость к вымыванию ванкомицина (1 %) из поливинил-хитозанового покрытия и увеличивает продолжительность антибактериальной устойчивости протеза с 4 до 5 суток по сравнению с гиалуроновой кислотой, а наличие поливинилпирролидона в составе покрытия на основе поливинил-хитозанового комплекса с L-аспарагиновой кислотой снижает устойчивость к вымыванию ванкомицина (1 %) из полимерного покрытия, но влияния на продолжительность антибактериальной устойчивости не оказывает (до 5 суток).

При оценке клеточных и тканевых реакций на 5-е сутки после имплантации сосудистых протезов по их периферии в гистологической картине группы 3, подгруппы В наблюдалось статистически значимо ($U = 39,50$; $p = 0,003$) большее количество фибробластов, чем у группы 2 (таблица 2).

Таблица 2. Показатели клеточного состава по периферии модификаций тканого сосудистого протеза

Table 2. Indicators of cellular composition along the periphery of woven vascular prosthesis modifications

Показатель	Группы и подгруппы	Сроки наблюдения		
		5-е сутки	14-е сутки	20 недель
Гистиоциты	Группа 2	1,0 [1,0; 1,0]	1,0 [0,0; 1,0]	1,0 [0,0; 1,0]
	Группа 3, подгруппа В	0,0 [0,0; 1,0]	0,0 [0,0; 2,0]	0,0 [0,0; 1,0]
Макрофаги	Группа 2	0,0 [0,0; 1,0]	1,0 [0,0; 2,0]	1,0 [0,0; 1,0]
	Группа 3, подгруппа В	0,0 [0,0; 1,0]	1,0 [0,0; 1,0]	0,0 [0,0; 1,0]
Фиброциты	Группа 2	3,0 [2,0; 3,0]	30,0 [20,0; 35,0]	40,0 [35,0; 58,0]
	Группа 3, подгруппа В	3,0 [2,0; 3,0]	25,0 [20,0; 40,0]	55,0 [51,0; 60,0]

Окончание таблицы 2
End of Table 2

Показатель	Группы и подгруппы	Сроки наблюдения		
		5-е сутки	14-е сутки	20 недель
Фибробласты	Группа 2	4,0 [4,0; 4,0]*	55,0 [50,0; 63,0]	20,0 [17,0; 23,0]*
	Группа 3, подгруппа В	5,0 [4,0; 6,0]	56,0 [50,0; 61,0]	12,0 [10,0; 15,0]
Гигантские многоядерные клетки	Группа 2	0,0 [0,0; 0,0]	2,0 [1,0; 4,0]*	1,0 [1,0; 2,0]
	Группа 3, подгруппа В	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 1,0]

* Различия статистически значимы между группами ($p < 0,05$)

На 14-е сутки наблюдения количество гигантских многоядерных клеток было минимальным в группе 3, подгруппе В по сравнению с группой 2, различия статистически значимы, $U = 27,50$; $p < 0,001$ (таблица 2).

На 20-й неделе наблюдения количество фиброцитов определялось в группе 3, подгруппе В, и этот показатель был статистически значим при сравнении с группой 2 ($U = 60,50$; $p = 0,033$). Количество фибробластов было минимальным в группе 3, подгруппе В и было статистически значимо ниже в сравнении с группой 2 ($U = 38,00$; $p = 0,002$).

Результаты оценки клеточных и тканевых реакций после имплантации модификаций показывают, что добавление поливинилпирролидона в покрытие на основе поливинил-хитозанового комплекса с L-аспарагиновой кислотой нежелательно, так как на 5-е сутки наблюдается снижение количества клеток, формирующих волокна соединительной ткани — фибробластов, на 14-е сутки увеличивается продуктивная воспалительная реакция, а на 20-й неделе наблюде-

ния уменьшается трансформация грануляционной ткани в грубоволокнистую соединительную ткань.

Гидрогели имеют достаточную емкость для включения в их состав молекул антибиотиков, полимеров и наночастиц. Размеры ячеек гидрогелей обычно находятся в нанометровом диапазоне, что оптимально для диффузии биоактивных молекул. Трехмерная сеть гидрогеля способна набухать в водной среде и в биологических жидкостях организма, сохраняя свою структуру, при этом обеспечивать пролонгированное высвобождение биологически активных веществ [18]. Антибиотики при внесении в состав гидрогелей могут использоваться в значительно меньших дозах, чем при системном введении, что позволяет преодолевать антибиотикорезистентность бактерий и сокращать количество нежелательных эффектов [19].

При проведении оценки антибактериальной активности образцов группы 3, подгрупп А и В получены одинаковые результаты антибактериальной активности (таблица 3).

Таблица 3. Антибактериальная активность модификаций тканых сосудистых протезов в зависимости от наличия поверхностного заряда и механического вымывания антибактериального лекарственного средства

Table 3. Antibacterial activity of modifications of woven vascular prostheses depending on the presence of surface charge and mechanical leaching of the antibiotic

Подгруппы 3-й группы исследования	Ме (Q_1 ; Q_3), диаметр зоны подавления роста, мм		
	без вымывания	вымывание 1 сутки	вымывание 7 суток
Подгруппа А	23 (22; 24)	20 (20; 20)	19 (19; 19)
Подгруппа В	23 (22; 24)	20 (20; 20)	19 (19; 19)
p	> 0,05	> 0,05	> 0,05

Различия между подгруппами статистически незначимы ($p > 0,05$). Таким образом, по результатам испытаний установлено, что обработка коронным разрядом не оказывает влияние на

механическую устойчивость к вымыванию антибиотика из покрытия.

Заключение

Функциональные возможности полимерных материалов для медицинского использования могут быть существенно расширены путем их целевого модифицирования. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют рекомендовать для тканых сосудистых протезов полимерное покрытие на основе поливинилового спирта, хитозана, L-аспарагиновой кислоты

после замачивания в 1 %-ном растворе ванкомицина на протяжении 30 мин. Механическая устойчивость к вымыванию ванкомицина (1 %) и продолжительность антибактериальной устойчивости образцов тканых сосудистых протезов с полимерным покрытием из поливинилового спирта, хитозана, L-аспарагиновой кислоты не зависят от обработки коронным разрядом с плотностью электретоного заряда до 0,3 мкКл/м² ($p > 0,05$).

Список литературы / References

1. Magill SS, Edwards JR, Bamberg W, Beldavs Z, Dumyati G, Kainer M. Emerging infections program healthcare-associated infections and antimicrobial use prevalence survey team. Multistate point-prevalence survey of health care-associated infections. *New Eng J Med*. 2014;370:1198-1208. DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1306801>
2. Бокерия Л.А., Абдулгасанов Р.А., Иванов А.В., Аракелян В.С. Текстильные сосудистые протезы в ангиохирургии. *Анналы хирургии*. 2019;24(3):165-174. DOI: <https://doi.org/10.24022/1560-9502-2019-24-3-165-174>
3. Bokeria LA, Abdulgasanov RA, Ivanov AV, Arakelyan VS. Textile vascular prostheses in angiosurgery. *Annals of Surgery*. 2019;24 (3):165-174. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24022/1560-9502-2019-24-3-165-174>
4. Дорошко Е.Ю., Лызикив А.А. Биомеханические свойства, патогенетические механизмы и пути инфицирования тканых сосудистых протезов в ангиохирургии. *Проблемы Здоровья и Экологии*. 2020;66(4):79-86. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2020-17-4-5>
5. Doroshko YaY, Lyzikov AA. Biomechanical properties, pathogenetic mechanisms and pathways of infection of tissue-engineered vascular conduits in angiosurgery. *Health and Ecology Issues*. 2020;(4):79-86. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2020-17-4-5>
6. Дорошко Е.Ю., Лызикив А.А., Каплан М.Л., Тихманович В.Е. Клинико-демографическая характеристика пациентов и факторы риска инфицирования искусственных сосудистых протезов после реконструктивных операций на аорто-подвздошно-бедренном сегменте. *Журнал ГрГМУ* [дата обращения 2025 январь 18]. Режим доступа: <http://journal-grsmu.by/index.php/ojs/article/view/2701>
7. Doroshko EYu, Lyzikov AA, Kaplan ML, Tikhmanovich VE. Clinical and demographic characteristics of patients and risk factors for infection of artificial vascular prostheses after reconstructive operations on the aorto-iliac-femoral segment. *GrSMU Journal* [date of access 2025 January 18]. Available from: <http://journal-grsmu.by/index.php/ojs/article/view/2701> (In Russ.).
8. Дорошко Е.Ю., Лызикив А.А., Тихманович В.Е., Каплан М.Л. Анализ инфекционных осложнений искусственных сосудистых протезов после операций на аорто-подвздошно-бедренном сегменте. *Хирургия. Восточная Европа*. 2021;10(4):508-516. DOI: <https://doi.org/10.34883/PI.2021.10.4.019>
9. Doroshko EYu, Lyzikov AA, Tikhmanovich VE, Kaplan ML. Analysis of infectious complications of artificial vascular prostheses after operations on the aorto-iliac-femoral segment. *Surgery Eastern Europe*. 2021;10(4):508-516. DOI: <https://doi.org/10.34883/PI.2021.10.4.019>
10. Chouirfa H, Bouloussa H, Migonney V, Falentin-Daudre C. Review of titanium surface modification techniques and coatings for antibacterial applications. *Acta Biomater*. 2019;83:37-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.10.036>
11. Hasan J, Crawford RJ, Ivanova EP. Antibacterial surfaces: the quest for a new generation of biomaterials. *Trends Biotechnol*. 2013;31:295-304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.01.017>
12. Li S, Dong S, Xu W, Tu S, Yan L, Zhao C, et al. Antibacterial hydrogels. *Adv Sci*. 2018;5:1700527. DOI: <https://doi.org/10.1002/adv.201700527>
13. Ng VW, Chan JM, Sardon H, Ono RJ, Garcia JM, Yang YY, et al. Antimicrobial hydrogels: a new weapon in the arsenal against multidrug-resistant infections. *Adv Drug Del Rev*. 2014;78:46-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2014.10.028>
14. Bhattarai RS, Das A, Alzhrani RM, Kang DJ, Bhaduri SB, Boddu SHS. Comparison of electrospun and solvent cast polylactic acid (PLA)/polyvinyl alcohol (PVA) inserts as potential ocular drug delivery vehicles. *Materials Science and Engineering*. 2017;77:895-903. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.305>
15. Ou KK, Dong X, Qin CL, Ji XN, He JX. Properties and toughening mechanisms of PVA/PAM double-network hydrogels prepared by freeze-thawing and anneal-swelling. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications*. 2017;77:1017-1026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.287>
16. Hu B, Ow H, Chee PL, Leow WR, Liu X, Wu Y-L. Supramolecular hydrogels for antimicrobial therapy. *Chem Soc Rev*. 2018;47:6917-6929. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.202001349>
17. Zhao C, Zhou L, Chiao M, Yang W. Antibacterial hydrogel coating: Strategies in surface chemistry. *Adv Colloid Interface Sci*. 2020;285:102280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102280>
18. Cikhoreva G, Bannikova G, Stolbushkina P, Panov A, Drozd N, Makarov V, et al. Preparation and anticoagulant activity of a lowmolecular-weight sulfated chitosan. *Carbohydr Polym*. 2005;62(4):327-332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpms.2019.11.003>
19. Muxika A, Etxabide A, Uranga J, Guerrero P, de la Caba K. Chitosan as a bioactive polymer: Processing, properties and applications. *Int J Biol Macromol*. 2017;105(2):1358-1368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.087>
20. Лызикив А.А., Тапальский Д.В., Дорошко Е.Ю., Цветкова Е.А., Зятыков А.А., Каплан М.Л. [и др.]. Антибактериальная устойчивость модифицированных тканых сосудистых протезов при моделировании инфицированной раны в эксперименте. *Проблемы Здоровья и Экологии*. 2022;19(1):83-92. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-1-11>
21. Lyzikov AA, Tapalski DV, Doroshko YY, Tsvetkova EA, Ziatskov AA, Kaplan ML, et al. Antibacterial resistance of modified woven vascular prostheses in experimental infected wound modeling. *Health and Ecology Issues*. 2022;19(1):83-92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-1-11>
22. Лызикив А.А., Надыров Э.А., Дорошко Е.Ю. Клеточные и тканевые реакции в ответ на имплантацию модификаций искусственных сосудистых протезов в эксперименте. *Проблемы Здоровья и Экологии*. 2022;19 (1): 93-101. DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-1-12>
23. Lyzikov AA, Nadyrov EA, Doroshko YY. Cell and tissue reactions in response to experimental implantation of modified artificial vascular prostheses. *Health and Ecology Issues*. 2022;19(1):93-101. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-1-12>

18. Li J, Mooney DJ. Designing hydrogels for controlled drug delivery. *Nat Rev Mater.* 2016;1:16071.

DOI: <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.71>

19. Yang K, Han Q, Chen B, Zheng Y, Zhang K, Li Q. Antimicrobial hydrogels: promising materials for medical application. *Int J Nanomedicine.* 2018;13:2217.

DOI: <https://doi.org/10.2147/IJN.S154748>

Информация об авторах / Information about the authors

Дорошко Евгений Юрьевич, к.м.н., старший преподаватель кафедры хирургических болезней № 1 с курсом сердечно-сосудистой хирургии, УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5395-5044>

e-mail: ronaldy93@mail.ru

Каплан Марк Львович, к.м.н., доцент, заведующий кафедрой хирургических болезней № 1 с курсом сердечно-сосудистой хирургии, УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-3281>

e-mail: kaplan_md@mail.ru

Артюшков Евгений Леонидович, старший преподаватель кафедры хирургических болезней № 1 с курсом сердечно-сосудистой хирургии, УО «Гомельский государственный медицинский университет», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5493-0164>

e-mail: artyushkov.e@mail.ru

Винидиктова Наталья Сергеевна, к.т.н., старший научный сотрудник отдела «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси», Гомель, Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2613-6742>

Yauheni Y. Doroshko, Candidate of Medical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Surgery No.1 with the course of Cardiovascular Surgery, Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5395-5044>

e-mail: ronaldy93@mail.ru

Mark L. Kaplan, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Surgery No.1 with the course of Cardiovascular Surgery, Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7782-3281>

e-mail: kaplan_md@mail.ru

Evgeniy L. Artyushkov, Senior Lecturer at the Department of Surgical Diseases No.1 with the course of Cardiovascular Surgery, Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5493-0164>

e-mail: artyushkov.e@mail.ru

Natalia S. Vinidiktova, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher at the Department "Composite Materials and Polymer Recycling", V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2613-6742>

Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Дорошко Евгений Юрьевич

e-mail: ronaldy93@mail.ru

Yauheni Y. Doroshko

e-mail: ronaldy93@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 08.10.2024

Поступила после рецензирования / Accepted 18.12.2024

Принята к публикации / Revised 12.05.2025