

Разработка ранозаживляющего сорбирующего материала с нановолокнистым покрытием

М. С. Карнилов¹, Д. Б. Рыклин¹,
В. Д. Меламед², М. А. Демидова¹

¹Витебский государственный технологический университет,

²Гродненский государственный медицинский университет,
Республика Беларусь

Аннотация. Создание новых видов высокоэффективных раневых покрытий и перевязочных материалов является актуальной задачей. Статья посвящена разработке и исследованию ранозаживляющих материалов, состоящих из сорбирующей подложки и нановолокнистого покрытия, полученного методом электроформования. В качестве подложки выбран нетканый материал спанлейс, сорбирующие свойства которого были повышены в результате пропитки раствором альгината натрия. Нановолокнистое покрытие формировалось из раствора хитозана и поливинилового спирта. Определены рациональный состав прядильного раствора и режимы работы установки Fluidnatek LE-50, обеспечивающие стабильность процесса электроформования. Анализ изображений структуры образцов, полученных при помощи электронной микроскопии, показал, что полученные нановолокнистые покрытия отличались равномерностью нанесения нановолокон и незначительным количеством дефектов. Осуществлена оценка заживляющих свойств сорбирующих раневых нановолокнистых покрытий, проведенная на основании изучения процессов регенерации полнослойных кожных ран половозрелых нелинейных белых крыс. Данные гистологических исследований свидетельствуют об ускоренной эпителизации первично-контаминированных кожных ран при применении хитозан-альгинатных раневых покрытий. Это подтверждается ускоренной эпителизацией раневой поверхности, формированием более мощного пласта эпидермиса, установлением его более тесных связей с формирующейся дермой, ускоренным развитием дермы, меньшей выраженностью воспалительных процессов в ране.

Ключевые слова: ранозаживляющий материал, сорбирующие свойства, электроформование, нановолокна, альгинат натрия, хитозан, поливиниловый спирт.

Информация о статье: поступила 10 июня 2026 года.

Development of a wound-healing sorbent material with a nanofiber coating

Mikhail S. Karnilau¹, Dzmitry B. Ryklin¹,
Vladimir D. Melamed², Mariya A. Demidova¹

¹Vitebsk State Technological University,

²Grodno State Medical University,
Republic of Belarus

Abstract. The creation of new types of highly effective wound coverings and dressings is an urgent task. The article is devoted to the development and investigation of wound-healing materials consisting of a sorbent substrate and a nanofibrous coating obtained by electrospinning. Nonwoven spunlace was chosen as the substrate, and its sorption properties were enhanced by impregnation with a sodium alginate solution. The nanofibrous coating was formed from a solution of chitosan and polyvinyl alcohol. The rational composition of the spinning solution and operating modes of the Fluidnatek LE-50 that ensure the stability of the electrospinning process were determined. Analysis of SEM images of the structure of the samples showed that the resulting nanofibrous coatings were distinguished by the uniformity of nanofiber deposition and a small number of defects. An assessment of the healing properties of sorbent wound nanofibrous coatings was carried out based on the study of the regeneration processes of full-thickness skin wounds in mature nonlinear white rats. Data from histological studies indicate accelerated epithelization of primarily contaminated skin wounds when using chitosan-alginate wound dressings. This is confirmed by the accelerated epithelization of the wound surface, the formation of a more powerful layer of the epidermis, the establishment of its closer connections with the developing dermis, the accelerated development of the dermis, and the less severe inflammatory processes in the wound.

Keywords: wound healing material, sorbent properties, electrospinning, nanofibers, sodium alginate, chitosan, polyvinyl alcohol.

Article info: received June 10, 2026.

Введение

За последние годы значительно вырос объем рынка средств для лечения хронических ран. Согласно отчету «Chronic Wound Care Market Report 2026»¹ среднегодовой темп его роста составляет 7,4 %. По представленным в отчете прогнозам объем рынка таких средств в 2026 году достигнет 17,64 млрд долларов. При этом к основным тенденциям прогнозируемого периода относятся растущее внедрение современных перевязочных материалов, увеличение использования устройств для терапии ран отрицательным давлением, расширение интеграции интеллектуальных решений для мониторинга ран, расширение ассортимента биоактивных и антимикробных перевязочных материалов, а также повышенное внимание к персонализированному уходу за ранами. В связи с этим актуальной задачей является разработка высокоэффективных раневых покрытий и перевязочных материалов, способных не только оказывать лечебный эффект за счет наличия в них лекарственных компонентов, но и создавать непосредственно в ране среду, благоприятствующую заживлению [Кудряшова и др., 2021].

Известно, что эффективность перевязочных материалов для лечения ран во многом обусловлена их сорбционными свойствами. Обширные раны продуцируют значительное количество экссудата – до 0,35 мл/см² в сутки. Удаление выделяющегося экссудата с раневой поверхности необходимо для предотвращения обратного всасывания в организм токсичных продуктов распада некротических тканей [Ушмаров и др., 2024; Бровко и др., 2023].

Разработка раневых покрытий всегда осуществляется с учетом их сорбционных свойств. В медицине принято выделять различные группы сорбирующих веществ. Так, по коллоидно-химическим принципам функционирования сорбенты подразделяются на:

- волокнистые материалы гидрофильной природы, обладающие средней удельной поверхностью,

пористостью и включающие в свой состав малоактивные функциональные группы. Это традиционные целлюлозные перевязочные материалы – марля, вата, вязкие волокна, которые при контакте с раневым экссудатом способны несколько увеличить свою достаточно ограниченную сорбционную структуру [Абаев, 2005; Капуцкий и Абаев, 2001];

- гидрофильные материалы и вещества, способные в водных средах неограниченно набухать и образовывать гели и гелеобразные структуры. При высыхании они образуют на раневой поверхности прочное защитное покрытие. К этим веществам относятся производные поливинилового спирта, альгиновой кислоты, окисленной целлюлозы, полиэтиленоксид, гель декстрана, а также соединения, образующие гелевые структуры – силикагели, желатин, хитин [Абаев, 2005; Mogoşanu and Grumezescu, 2014];

- полимерные материалы и вещества гидрофобной природы, в том числе синтетические полимерные материалы (кремнийорганические, полиуретановые, полиметилсилоксановые и др.), а также угольные вещества и углеволокнистые сорбенты, которые абсорбируют экссудат и бактерии из раневого ложа в перевязочный материал и работают как способ механической очистки раневой поверхности [Ославский, 2016].

При этом перспективными являются исследования, посвященные созданию комплексных, высокоэффективных раневых покрытий, способных обеспечить сочетание сразу нескольких коллоидно-химических принципов функционирования.

При проектировании современных перевязочных материалов учитывается необходимость придания им многофункциональных свойств, таких как эффективный контроль экссудата, антимикробное действие, контролируемое высвобождение лекарственных средств для ускорения регенерации тканей и адаптация к различным стадиям заживления ран [Остроушко и др., 2024].

Создание пористой структуры раневого покрытия приобретает особую значимость, поскольку пористая структура сорбирующих материалов не только обеспечивает эффективное дренирование раневого экссудата и создание влажной среды, необходимой для заживле-

¹ https://www.researchandmarkets.com/report/chronic-wound?utm_source=GNE&utm_medium=PressRelease&utm_code=rl_7vrrqfj&utm_campaign=1933275+-++Global+Hy&utm_exec=kamumsai

ния, но и позволяет использовать их в качестве матриц для контролируемого высвобождения лекарственных препаратов, что способствует ускоренной регенерации тканей.

Экспериментально подтверждено, что сорбирующие покрытия эффективны при лечении ожоговых ран, в том числе осложненных инфекцией, а использование современных методов (например, сверхкритической сушки или циклической заморозки) позволяет получать материалы с высокоразвитой пористой структурой и улучшенными функциональными свойствами (Цыганков и др., 2025).

При этом использование тканей или нетканых материалов в роли подложек для инновационных раневых покрытий имеет свои ограничения, поскольку в связи с их ворсистой структурой существует вероятность попадания частиц материала непосредственно в рану, что может препятствовать её заживлению. Требуется создание защитной мембраны для предотвращения попадания частиц сорбента в рану, при этом такая мембрана не должна препятствовать ее заживлению, быть биосовместимой и биodeградируемой, пропускать экссудат. Такой мембраной может стать нановолокнистый слой, получаемый методом электроформования.

Сущность электроформования заключается в получении нановолокон за счет воздействия электрического поля на раствор или расплав полимера (Haider A., Haider S. and Kang, 2018; Stace et al., 2019). Электроформование позволяет получать пленки и композиционные материалы, структура и состав которых обеспечивают достижение заданного уровня водо – и паропроницаемости, антисептических свойств. В литературе описан ряд медицинских и биоинженерных изделий санитарно-гигиенического, косметологического и лечебного назначения, в том числе, для обеспечения доставки лекарств и заживление ран (Wang, 2009). Нановолокнистые материалы, как лечебное средство, применяются в качестве различных покрытий, в которых они выполняют как защитные, так и лечебные функции при повреждениях, например, внутренних органов (Chagas et al., 2021; Hermenegildo et al., 2022).

Таким образом, целью данной работы являлась разработка перевязочного сорбирующего материала с нановолокнистым покрытием.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать рациональный состав прядильного

раствора для получения нановолокнистого покрытия.

2. Выбрать и модифицировать сорбирующую подложку для нанесения нановолокнистого покрытия.

3. Определить режимы электроформования при использовании хитозаносодержащих растворов.

4. Оценить ранозаживляющие способности образцов при лечении экспериментальных гнойных ран.

Методы и средства исследований

Перспективным направлением разработки раневых покрытий является получение нановолокнистых пленок на основе различных гидрофильных материалов и веществ, одним из которых являются различные виды хитозана (Прокопчук, 2015; Пирнязов и др., 2026). Хитозан – это природный полисахарид, полученный путем удаления ацетильных групп из хитина, который обладает различными физиологическими свойствами, такими как нетоксичность, иммуностимулирующее действие, антимикробное действие, биоразлагаемость и биосовместимость. Поэтому нановолокна, полученные из хитозана, используются при гемостазе и заживлении ран (Yu et al., 2025; Wang et al., 2025).

С точки зрения проведения процесса электроформования растворы из хитозана обладают специфическими свойствами. Хитозан – это катионный полимерный электролит, который несет положительный заряд при растворении в растворе, а молекулы с аналогичными зарядами будут отталкиваться друг от друга, нарушая конус Тейлора, тем самым затрудняя электроформование. Поэтому хитозан обычно смешивают с другими полимерами, способными стабилизировать процесс электроформования, а также обладающими необходимыми лечебными свойствами (Гебремарьям и др., 2025).

При выборе стабилизирующего полимера для получения нановолокнистых пленок на основе хитозана принимались во внимание такие предъявляемые к нему требования, как биосовместимость, биodeградируемость, а также приемлемые механические свойства получаемых материалов: низкая жесткость, достаточная прочность, предотвращающая повреждение пленки при хирургических манипуляциях, а также при воздействии потока крови (Gao et al., 2021; Pillai et al., 2021).

В литературе описано использование в роли добавок таких полимеров, как полиэтиленоксид, полилактид и поливиниловый спирт. Так, например, при исследовании процесса электроформования растворов хитозана было установлено, что содержание полиэтиленоксида Sigma Aldrich (CША) высокой молекулярной массы

400 кДа позволяет улучшить стабильность процесса [Прокопчук и Прищепенко, 2022]. Однако данная добавка имеет свои недостатки: полиэтиленоксид обладает высокой стоимостью, около €387,00 за 500 г².

В роли добавки в раствор хитозана для получения сорбирующих раневых покрытий был выбран поливиниловый спирт (ПВС). ПВС является биосовместимым полимером, не оказывает токсической нагрузки на организм пациента и не вызывает иммунного ответа, обладает специфическим характером и скоростью растворения, способен выводиться из организма пациента и не накапливается в тканях и органах. Благодаря нетоксичности, ПВС применяется в медицине в качестве клеев, пластырей, стерильных салфеток, хирургических нитей, фармацевтических препаратов, для изготовления плазмозаменяющих растворов и раневых покрытий. ПВС является водорастворимым полимером, в связи с чем широко применяется в инновационной медицине для получения нановолокнистых материалов с высокой скоростью растворения [Рыклин и др., 2024а]. ПВС гигроскопичен, растворяется в холодной воде крайне медленно, но при повышенных температурах (около 90 °C) достаточно быстро переходит в раствор [Николаев и Охрименко, 1979]. Однако скорость растворения волокон поливинилового спирта зависит не только от температуры растворителя, но и структуры материала. Так нановолокнистая структура из ПВС растворяется практически мгновенно.

Известно, что нановолокнистые пленки не обладают выраженным сорбционным эффектом, что накладывает определенные ограничения при использовании их в качестве раневых покрытий. В связи с этим, важное значение в процессе разработки перевязочного сорбирующего материала с нановолокнистым покрытием приобретает выбор сорбирующей подложки для нанесения нановолокнистого слоя.

Современные сорбирующие средства на основе нетканых материалов находят широкое применение в медицине, гигиене и текстильной промышленности благодаря их высокой проницаемости, гибкости и возможностям функциональной модификации. Одним из таких материалов является спанлейс – нетканый материал, получаемый методом гидроскрепления, отличающийся высокой прочностью и мягкостью, сорбирующими свойствами, а также относительно невысокой стоимостью

и широкой доступностью. Однако его влагопоглощающие свойства ограничены, что является существенным недостатком при необходимости лечения высокоэкссудативных гнойных ран.

Известны различные способы повышения сорбционных свойств материалов [Седанова и др., 2025]: модификация поверхности, использование композитных материалов, регулирование гидрофильности/гидрофобности.

В рамках исследования был выбран метод повышения гидрофильности материала спанлейс посредством предварительной пропитки 1,5 % водным раствором альгината натрия. Альгинат натрия – природный полисахарид, обладающий высокой гидрофильностью и способностью к гелеобразованию, что делает его перспективным модификатором для улучшения водоудерживающих свойств подложек [Григорьян и др., 2022].

Наработка нановолокнистых раневых покрытий осуществлялась на установке Fluidnatek LE-50 с использованием специально разработанной прядильной головки (эмиттера), обеспечивающей стабильный процесс электроформования при расстоянии между эмиттером и коллектором, равном 6 см, что существенно меньше значения, устанавливаемого в случае применения стандартной прядильной головки. Предыдущие исследования показали, что уменьшение расстояния между прядильными электродами приводит к повышению диаметра нановолокон, что способствует снижению скорости биodeградации [Рыклин и др., 2024b]. При этом модифицированная сорбирующая подложка закреплялась на прядильном барабане (коллекторе), на который подавался отрицательный потенциал, а через прядильную головку подавался волокнообразующий раствор на основе хитозана с добавлением ПВС. После формования полученные образцы сушились в сухожаровом шкафу при температуре 40 градусов в течение 60 минут для удаления остатков уксусной кислоты в материале.

Особенности структуры получаемых нановолокнистых покрытий изучались на основе анализа изображений, полученных с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO 1420 [Carl Zeiss, Германия].

Для оценки эффективности применения сорбирующих материалов с нановолокнистыми покрытиями проведено исследование процессов регенерации полнослойных кожных ран у 16 половозрелых нелинейных белых крыс в возрасте 4–5 месяцев, массой 180–230 грамм, полученных из вивария УО «Гродненский

² <https://www.sigmaaldrich.com/BY/en/product/aldrich/372773>

государственный медицинский университет».

Моделирование экспериментальной первично-контаминированной кожной раны у лабораторных крыс осуществлялось в условиях операционной с соблюдением правил обезболивания, асептики и антисептики. Под эфирным наркозом по закрытому контуру на спине животных в межлопаточной области по вертебральной линии выщипывался подшерсток, выбривалась шерсть. После обработки области манипуляции дважды антисептиком «Септоцид» в данной зоне маркировали и формировали экспериментальную кожную рану с подшиванием предварительно простерилизованной предохранительной камеры с целью предотвращения контракции раневого дефекта.

Через 3 суток после операции происходило формирование первично-контаминированной раны за счет биоценоза условий нахождения крысы в условиях вивария. В дальнейшем для лечения первично-контаминированных ран (через 3 суток) у 11 крыс опытной группы накладывали на раны разработанные образцы медицинских изделий, содержащих пропитанный альгинатом натрия сорбирующий слой из нановолокнистого покрытия из хитозана и поливинилового спирта (хитозан-альгинатные раневые покрытия). У 5 крыс контрольной группы на раны накладывали повязку с водорастворимой мазью «Меколь». Данный препарат наиболее часто применяется в хирургической практике при лечении гнойных ран. Крыс выводили из эксперимента на 3-и, 7-е и 11-е сутки посредством передозировки эфирного наркоза.

Осуществлялись планиметрические исследования – во время перевязок и в дни вывода из эксперимента кожные раны фотографировали с помощью цифровой фотокамеры, а полученные изображения изучали с помощью компьютерного анализатора изображения для измерения общей площади раны, площади зоны эпителизации и площади открытой, неэпителизированной части раны.

После выведения животных из эксперимента производили в области кожной раны забор кусочков кожи с последующим приготовлением препаратов для гистологических исследований – иссекали участки ран и прилежащих тканей с последующей подготовкой гистологических препаратов. Оценивали клеточный состав раны и покрывающего её новообразованного эпителия, состояние подлежащей соединительной и мышечной тканей, выраженность перифокальных воспалитель-

ных изменений. Изучение гистологических препаратов проводилось с помощью исследовательского микроскопа Axioscop 2 plus (Zeiss, Германия) (при увеличениях 25–900 крат) с цифровой видеокамерой DFC320 (Leica, Германия) и программы компьютерного анализа изображения ImageWarp (Bit Flow, США).

Исследования заживляющих свойств сорбирующих раневых нановолокнистых покрытий были выполнены в условиях разработанной адекватной анестезии под эфирным наркозом по закрытому контуру с разрешения Этического комитета УО «Гродненский государственный медицинский университет», а также в соответствии с «Европейской Конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях».

Результаты исследований

С целью разработки оптимального состава прядильного раствора данное исследование фокусировалось на подборе минимально необходимого количества добавки ПВС для стабилизации процесса электроформования без ухудшения эффективности его медицинских свойств хитозана. При этом особое внимание уделялось контролю вязкости прядильного раствора с целью беспрепятственного прохождения его через иглу эмиттера установки.

Разработка состава прядильного раствора осуществлялась на основе требований к его динамической вязкости и результатах предварительных экспериментов. В литературе отмечается, что для получения нановолокон методом электроформования обычно используются растворы полимеров с весовой концентрацией до 20 % и динамической вязкостью от 50 до 1000 мПа·с [Демидова и др., 2025].

Ранее было установлено, что процесс электроформования волокон из растворов на основе хитозана с добавлением ПВС затруднялся при динамической вязкости более 250 мПа·с. Также при определении рационального состава раствора был учтен тот факт, что эффективность процесса повышается с увеличением содержания в растворе поливинилового спирта и уксусной кислоты [Рыклин и др., 2025].

Концентрация ПВС выбиралась экспериментальным путем на основе анализа стабильности процесса электроформования.

Предварительные исследования показали, что содержание в прядильном растворе 9,6 % хитозана и 1 % ПВС не является приемлемым, процесс электроформования

вания волокон из такого раствора протекал недостаточно стабильно, что не приводило к формированию четко структурированной нановолокнистой структуры материала. При увеличении содержания ПВС в 2 раза процесс стабилизировался.

Разработанная технология получения прядильного раствора для нанесения нановолокнистого раневого покрытия состоит из следующих этапов:

1. Приготовление 12 % раствора хитозана: растворение хитозана в 80 % растворе уксусной кислоты при комнатной температуре с периодическим перемешиванием до его полного растворения.

2. Приготовление водного 10 % раствора ПВС на водяной бане при температуре 60–70 градусов в течении 30 минут с постоянным перемешиванием.

3. Смешивание растворов хитозана и ПВС в соотношении 4 : 1.

В результате исследований были определены рациональные режимы электроформования для получения перевязочного сорбирующего материала с нановолокнистым покрытием (таблица 1). Установлено, что при использовании разработанного состава раствора, процесс электроформования остается стабильным, с наличием незначительных допустимых колебаний конуса Тейлора (в пределах 0.5–1 см).

Изображения структуры нановолокнистых материалов, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 1.

Разработанные образцы сорбирующих раневых нановолокнистых покрытий отличались визуальной равномерностью нанесения покрытия, имели белый цвет и обладали тактильной гладкостью, не теряли и не изменяли своей структурной целостности при сгибании. Использованная при получении образцов модифицированная сорбирующая подложка не оказывала негативного влияния на протекание процесса электроформования, снятие нановолокнистого покрытия с прядильного барабана, а также не отслаивалась от полимерного слоя при использовании сорбирующего раневого покрытия по назначению.

Анализ изображений структуры образцов, полученных при помощи электронной микроскопии, показал, что полученные материалы отличались равномерностью нанесения нановолокон. Отсутствие существенного количества дефектов свидетельствует о стабильности процесса электроформования, оптимально подобранном составе прядильного раствора из хитозана с добавлением ПВС, а также о рациональности предлагаемых режимов процесса.

Результаты макроскопического исследования кожных ран у контрольных животных показали, что через 1 сутки размеры раны существенно не отличались от исходной, а через 3 суток начинали уменьшаться в обеих группах. Однако после пятых суток прослеживалась статистически значимая динамика уменьшения ран в опытной группе по сравнению с контрольной. Так, в процентном соотношении заживление ран на 5-е, 7-е и 11-е

Таблица 1 – Состав прядильного раствора и параметры процесса электроформования
Table 1 – Composition of the spinning solution and parameters of the electrospinning process

Наименование параметра	Значение параметра
Состав прядильного раствора:	
– хитозан	9,6 %
– ПВС	2,0 %
– уксусная кислота	56,3 %
– вода	32,1 %
Состав нановолокнистого покрытия:	
– хитозан	82,8 %
– ПВС	17,2 %
Расход, мл/ч	0,9
Потенциал эмиттера, кВ	20
Потенциал коллектора, кВ	-6

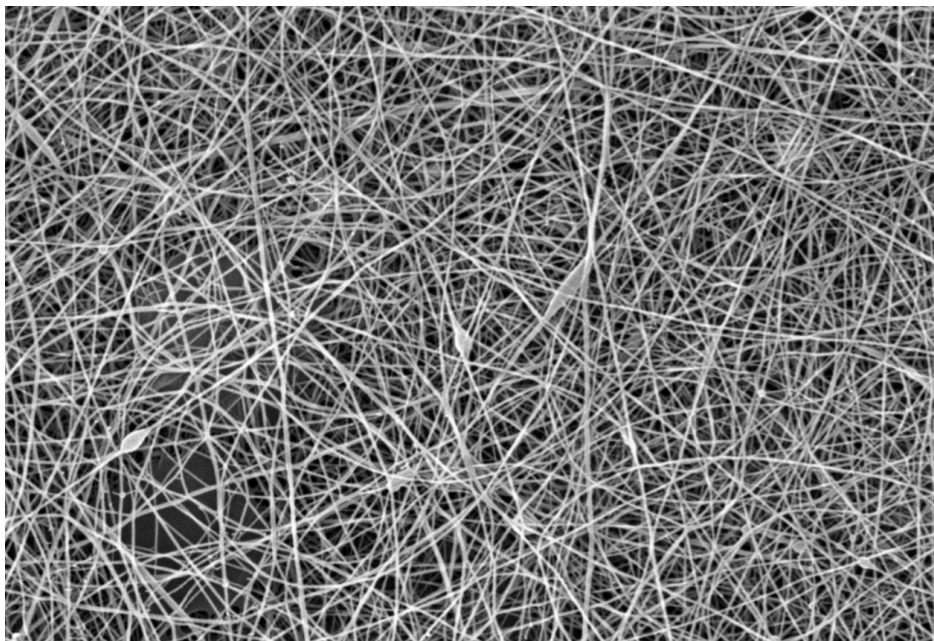


Рисунок 1 – Структура нановолокнистого покрытия
Figure 1 – Structure of the nanofibrous coating

сутки в группе животных с применением хитозан-альгинатных повязок составляло $48,6 \pm 2,6 \%$, $32,1 \pm 4,1 \%$ и $0,4 \pm 0,1 \%$, а в контрольной группе $63,6 \pm 3,9 \%$, $47,2 \pm 5,6 \%$ и $18,5 \pm 0,7 \%$ соответственно. Динамика заживления ран в исследуемых группах после операции представлена на рисунке 2.

На 11-е сутки у животных обеих групп детрит не обнаружен. У крыс контрольной группы рана очистилась, но не эпителизовалась (незажившая часть составляет $18,5 \pm 0,7 \%$). В ране обнаружена созревающая грануляционная ткань с наличием как редуцированных, так и нередуцированных сосудов, слабо выраженная клеточная инфильтрация, представленная преимущественно фибробластами и фиброцитами, а также отмечается разрастание рыхлой соединительной ткани.

В аналогичный срок у крыс опытной группы раневой дефект резко уменьшился в размерах и практически зажил, составляя $0,4 \pm 0,1 \%$. В дне раны определяется созревшая неспецифическая грануляционная ткань с наличием редуцированных сосудов и скудной клеточной инфильтрацией с преобладанием фибробластов и фиброцитов, а также разрастание рыхлой соединительной ткани. В краях раны со всех сторон определяются при-

знаки регенерации эпителия с тенденцией к полному закрытию раневого дефекта.

Данные гистологических исследований свидетельствуют об ускоренной эпителизации первично-контаминированных кожных ран при применении хитозан-альгинатных раневых покрытий. Это подтверждается ускоренной эпителизацией раневой поверхности, формированием более мощного пласта эпидермиса, установлением его более тесных связей с формирующейся дермой, ускоренным развитием дермы, меньшей выраженностью воспалительных процессов в ране.

Выводы

В рамках исследования был разработан сорбирующий материал с нановолокнистым покрытием для использования в медицине. В качестве волокнообразующего полимера был выбран хитозан, что обусловлено его уникальными ранозаживляющими свойствами, в роли стабилизирующего полимера – поливиниловый спирт.

Предложена технология получения бикомпонентного прядильного раствора для нанесения нановолокнистого раневого покрытия, а также рациональные режимы его наработки, обеспечивающие стабильность протекания

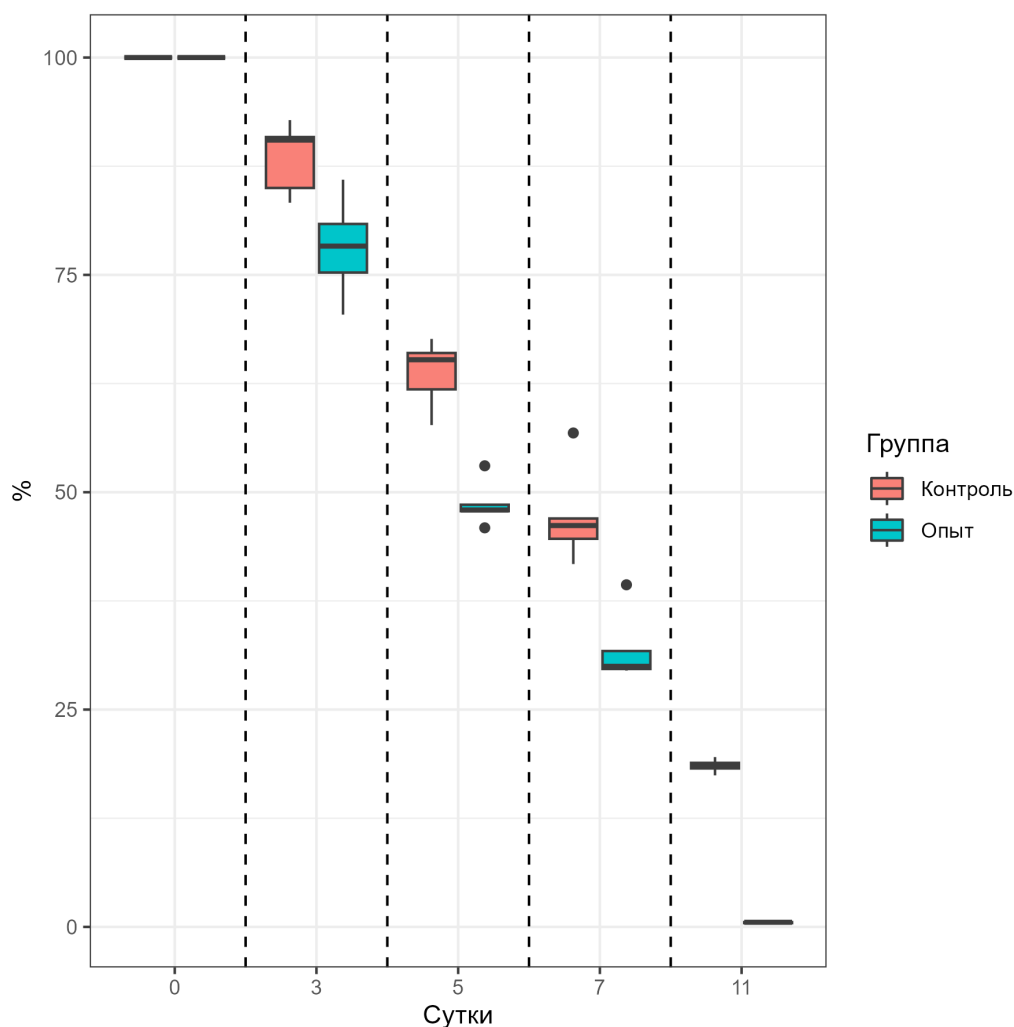


Рисунок 2 – Коробчатые диаграммы заживления ран в опытной и контрольной группах
(временные срезы, в процентах)

Figure 2 – Box plots of wound healing in the experimental and control groups
(temporal cross-section, in percentages)

процесса электроформования.

В роли подложки для получения перевязочного сорбирующего материала с нановолокнистым покрытием был выбран нетканый материал спанлейс, для повышения сорбционных свойств которого предложена пропитка раствором альгината натрия.

Анализ изображений микроструктуры образцов показал, что полученные материалы отличались равномерностью нанесения нановолокон и их хаотичной структурой с наличием небольших дефектов, что свиде-

тельствует об эффективности предлагаемой технологии получения нановолокнистого раневого покрытия.

Исследования заживляющих свойств сорбирующих раневых нановолокнистых покрытий, проведенные на основании изучения процессов регенерации полно-слойных кожных ран половозрелых нелинейных белых крыс, показали достоверно статистически значимое ускорение заживления экспериментальных кожных ран при использовании разработанных раневых покрытий, что подтверждается рядом значимых признаков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Абаев, Ю.К. (2005). *Хирургическая повязка*. Минск: Беларусь, Республика Беларусь.
- Бровко, О.С., Паламарчук И.А., Горшкова, Н.А., Богданович, Н.И. и Ивахнов, А.Д. (2023). Сорбционно-структурные свойства аэрогельных материалов на основе биополимеров. *Известия вузов. Лесной журнал*, Том № 6, С. 190–203.
- Гебремарьям, Е.З., Химма, М.А., Олехнович, Р.О. и Успенская, М.В. (2025). Влияние свойств раствора ацетата целлюлозы/хитозана/поливинилового спирта на морфологию электроспряденных нановолокон. *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*, Том № 18(3), С. 355–367.
- Григорьян, А.Ю., Бежин, А.И., Панкрушева, Т.А. и Суковатых, Б.С. (2022). Современное представление о раневых покрытиях. *Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова*, Том № 11, С. 42–48.
- Демидова, М.А., Рыклин, Д.Б. и Ясинская, Н.Н. (2025). *Технология получения водорастворимых нановолокнистых материалов методом электроформования : монография*. Витебск: УО «ВГТУ», Республика Беларусь.
- Капуцкий, В.Е., Абаев, Ю.К. (2001). Рациональные подходы к классификации сорбционно-активных перевязочных материалов. *Материалы третьего конгресса ассоциации хирургов имени Н. И. Пирогова*, Москва, 15–17 окт. 2001 года, С. 212.
- Кудряшова, И.С., Марков, П.А., Костромина, Е.Ю., Еремин, П.С., Рачин А.П. и Гильмутдинова, И.Р. (2021). Разработка раневых покрытий для регенеративной медицины. *Вестник восстановительной медицины*, Том № 20(6), С. 84–95.
- Николаев, А.Ф., Охрименко, Г.И. (1979). *Водорастворимые полимеры*. Ленинград: Л.: Химия, СССР.
- Ославский, А.И. (2016). Сорбционные средства и методы в комплексном лечении гнойных ран (обзор литературы). *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*, Том № 3, С. 30–37.
- Остроушко, А.П., Ян, К.С., Лаптиёва, А.Ю., Андреев, А.А., Глухов, А.А., Аралова, М.В., Микулич, Е.В. и Коновалов, П.А. (2024). Свойства, преимущества и показания к применению современных биоактивных и интерактивных раневых покрытий. *Политравма*, Том № 4, С. 92–103.
- Пирнязов, К.К., Милушева, Р.Ю., Ашуров, Н.Ш. и Рашидова, С.Ш. (2026). Возможности формирования нановолокон из хитозана Bombyx mori. *Вестник Московского университета, серия 2, Химия*, Том № 67, С. 72–78.
- Прокопчук, Н.Р., Меламед, В.Д., Прищепенко, Д.В., Шашок, Ж.С. и Данишевский, В.Н. (2015). Технология электроформования нановолокон из хитозана. *Сборник докладов научно-практического семинара «Волокна и волокнистые материалы специального назначения. Исследования и разработки»*, Минск, 14 июля 2015 г., С. 4–6.
- Прокопчук, Н.Р., Прищепенко, Д.В. (2022). Получение нановолокон хитозана, модифицированных наночастицами металлов. *Материалы V Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке «Нефтегазохимия – 2022»*, Минск, 2–4 ноября 2022 г., С. 159–161.
- Рыклин, Д.Б., Демидова, М.А. и Карнилов, М.С. (2024а). Оценка паропроницаемости раневых повязок с нановолокнистым покрытием. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, Том № 2 (48), с. 18–27.
- Рыклин, Д.Б., Демидова, М.А., Карнилов, М.С. (2024б). Влияние межэлектродного расстояния на морфологию электроформованных нановолокнистых материалов. *Современные инженерные проблемы в производстве товаров народного потребления: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума IV Международного Косыгинского Форума «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета»*, Том 1, С. 283–287.
- Рыклин, Д.Б., Карнилов, М.С. и Демидова, М.А. (2025). Влияние состава прядильного раствора хитозана и поливинилового спирта на режимы процесса электроформования. *Материалы Международной научно-технической конференции «Современные экологически чистые инновационные технологии получения новых функциональных полимерных волокнистых и наноматериалов (Костандовские чтения)»*, Москва, 26–27 ноября 2025 г., С. 154–157.

Седанова, А.В., Корниенко, Н.В., Пьянова, Л.Г., Делягина, М.С. и Лавренов, А.В. (2025). Влияние добавок аминокислот на свойства углеродного сорбента, модифицированного салициловой кислотой. *Физикохимия поверхности и защита материалов*, Том 61(1), С. 3–10.

Ушмаров, Д.И., Гуменюк, С.Е., Григорьев, Т.Е., Шокель, О.Ю., Исянова, Д.Р. и Чумаков, П.И. (2024). Влияние химической сшивки глутаровым альдегидом на сорбционные параметры раневых покрытий на основе хитозана. *Медицинский вестник Северного Кавказа*, Том № 19(3), С. 243–246.

Цыганков, П.Ю., Абрамов, А.А., Бозорова, А.А., Евдокимова, С.А. и Меньшутин, Н.В. (2025). Процессы получения гибридных аэрогелей альгинат-хитозана и исследование их антибактериальной активности. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*, том № 83, Часть 3, С. 132–139.

Chagas, P.A.M., Schneider, R., Santos, D.M., Otuka, A.J.G., Mendoca, C.R. and Correa, D.S. (2021). Bilayered electrospun membranes composed of poly(lactic-acid)/natural rubber: A strategy against curcumin photodegradation for wound dressing application. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 163, art. 104889.

Gao, Z., Su, C., Wang, C., Zhang, Y., Wang, C., Yan, H. and Hou, G. (2021). Antibacterial and hemostatic bilayered electrospun nanofibrous wound dressings based on quaternized silicone and quaternized chitosan for wound healing. *European Polymer Journal*, vol. 159, art. 110733.

Haider, A., Haider, S. and Kang, I.K. (2018). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 11, pp. 1165–1188.

Hermenegildo, B., Ribeiro, C., Perinka, N., Martins, P., Trchova, M., Hajna, M., Stejskal, J. and Lanceros-Mendez, S. (2022). Electroactive poly (vinylidene fluoride) electrospun fiber mats coated with polyaniline and polypyrrole for tissue regeneration applications. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 170, art. 105118.

Mogoşanu, G.D., Grumezescu, A.M. (2014). Natural and synthetic polymers for wounds and burns dressing. *Int J Pharm*, vol. 463(2), pp. 27–36.

Pillai, M.M., Dandia, H., Checker, R., Rokade, S., Sharma, D. and Tayalia, P. (2021). Novel combination of bioactive agents in bilayered dermal patches provides superior wound healing. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, vol. 40, Art. 102495.

Stace, E.T., Mouthuy, P.A., Carr, A.J. and Ye, H.C. (2019). Biomaterials: Electrospinning. *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*, vol. 5, pp. 424–441.

Wang, H.S. (2009). Functional polymeric nanofibers from electrospinning. *Recent Patents on Nanotechnology*, vol. 3, pp. 21–31.

Wang, X., Shan, C., Huang, R., Penkova, A. and Su, R. (2025). Chitosan and chitosan nanofibers in wound dressings, from material preparation to functional design: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 333, part 2, art. 148937.

Yu, H., Chen, D., Lu, W., Zhang, C., Wang, H., Peng, Z., Jiang, H. and Xiao, C. (2025). Characterization of polyvinyl alcohol/chitosan nanofibers loaded with royal jelly by blending electrospinning for potential wound dressings. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 307, Part 2, art. 141977.

REFERENCES

- Abaev, Yu.K. (2005). *Surgical dressing* [Khirurgicheskaya povyazka]. Minsk: Belarus, Republic of Belarus (In Russian).
- Brovko, O.S., Palamarchuk, I.A., Gorshkova, N.A., Bogdanovich, N.I. and Ivakhnov, A.D. (2023). Sorption-structural properties of aerogel materials based on biopolymers [Sorbtsionno-strukturnye svoystva aerogel'nykh materialov na osnove biopolimerov]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal = Lesnoy Journal*, vol. 6, pp. 190–203 (In Russian).
- Gebremariam, E.Z., Khimma, M.A., Olekhovich, R.O. and Uspenskaya, M.V. (2025). Influence of the properties of cellulose acetate/chitosan/polyvinyl alcohol solution on the morphology of electrospun nanofibers [Vliyaniye svoystv rastvora atsetata tsellyulozy/khitozana/polivinilovogo spirta na morfologiyu elektrospryadennykh nanovolokon]. *Zhurnal Sibirskogo*

federal'nogo universiteta. Khimiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry, vol. 18(3), pp. 355–367 [In Russian].

Grigoryan, A.Yu., Bezhin, A.I., Pakrusheva, T.A. and Sukovatykh, B.S. [2022]. Modern understanding of wound dressings [Sovremennoe predstavlenie o ranevykh pokrytiyakh]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova = Surgery. Journal named after N.I. Pirogov*, vol. 11, pp. 42–48 [In Russian].

Chagas, P.A.M., Schneider, R., Santos, D.M., Otuka, A.J.G., Mendoca, C.R. and Correa, D.S. [2021]. Bilayered electrospun membranes composed of poly(lactic-acid)/natural rubber: A strategy against curcumin photodegradation for wound dressing application. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 163, art. 104889.

Demidova, M.A., Ryklin, D.B. and Yasinskaya, N.N. [2025]. *Tekhnologiya polucheniya vodorastvorimyykh nanovoloknistykh materialov metodom elektroformovaniya: monografiya* [Technology for producing water-soluble nanofibrous materials by electrospinning: monograph]. Vitebsk: Educational Institution "VSTU", Republic of Belarus [In Russian].

Gao, Z., Su, C., Wang, C., Zhang, Y., Wang, C., Yan, H. and Hou, G. [2021]. Antibacterial and hemostatic bilayered electrospun nanofibrous wound dressings based on quaternized silicone and quaternized chitosan for wound healing. *European Polymer Journal*, vol. 159, art. 110733.

Haider, A., Haider, S. and Kang, I.K. [2018]. A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 11, pp. 1165–1188.

Hermenegildo, B., Ribeiro, C., Perinka, N., Martins, P., Trchova, M., Hajna, M., Stejskal, J. and Lanceros-Mendez, S. [2022]. Electroactive poly (vinylidene fluoride) electrospun fiber mats coated with polyaniline and polypyrrole for tissue regeneration applications. *Reactive and Functional Polymers*, vol. 170, art. 105118.

Kaputsky, V.E. and Abaev, Yu.K. [2001]. Rational approaches to the classification of sorption-active dressing materials [Ratsional'nye podkhody k klassifikatsii sorbtsionno-aktivnykh perev'yazochnykh materialov]. *Materialy tret'ego kongressa assotsiatsii khirurgov imeni N.I. Pirogova = Proceedings of the 3rd Congress of the Association of Surgeons named after N.I. Pirogov*, Moscow, 15–17 October 2001, p. 212 [In Russian].

Kudryashova, I.S., Markov, P.A., Kostromina, E. Yu., Eremin, P.S., Rachin, A.P. and Gilmudinova, I.R. [2021]. Development of wound dressings for regenerative medicine [Razrabotka ranevykh pokrytiy dlya regenerativnoy meditsiny]. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny = Bulletin of Rehabilitation Medicine*, vol. 20(6), pp. 84–95 [In Russian].

Mogoşanu, G.D., Grumezescu, A.M. [2014]. Natural and synthetic polymers for wounds and burns dressing. *Int J Pharm*, vol. 463(2), pp. 27–36.

Nikolaev, A.F. and Okhrimenko, G.I. [1979]. *Vodorastvorimye polimery* [Water-soluble polymers]. Leningrad: L.: Chemistry, USSR [In Russian].

Oslavsky, A.I. [2016]. Sorption means and methods in the complex treatment of purulent wounds (literature review) [Sorbtsionnye sredstva i metody v kompleksnom lechenii gnoinykh ran (obzor literatury)]. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Journal of the Grodno State Medical University*, vol. 3, pp. 30–37 [In Russian].

Ostroushko, A.P., Yan, K.S., Laptiyeva, A.Yu., Andreev, A.A., Glukhov, A.A., Aralova, M.V., Mikulich, E.V. and Konovalov, P.A. [2024]. Properties, advantages and indications for the use of modern bioactive and interactive wound dressings [Svoystva, preimushchestva i pokazaniya k primeneniyu sovremennykh bioaktivnykh i interaktivnykh ranevykh pokrytiy]. *Politравma = Polytrauma*, vol. 4, pp. 92–103 [In Russian].

Pirniyazov, K.K., Milusheva, R.Yu., Ashurov, N.Sh. and Rashidova, S.Sh. [2026]. Possibilities of forming nanofibers from Bombyx mori chitosan [Vozmozhnosti formirovaniya nanovolokon iz khitozana Bombyx mori]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya = Moscow University Chemistry Bulletin*, vol. 67, pp. 72–78 [In Russian].

Pillai, M.M., Dandia, H., Checker, R., Rokade, S., Sharma, D. and Tayalia, P. [2021]. Novel combination of bioactive agents in bilayered dermal patches provides superior wound healing. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, vol. 40, Art. 102495.

Prokopchuk, N.R., Melamed, V.D., Prishchepenko, D.V., Shashok, Zh.S. and Danishevsky, V.N. [2015]. Technology of electrospinning of chitosan nanofibers [Tekhnologiya elektroformovaniya nanovolokon iz khitozana]. *Sbornik dokladov*

nauchno-prakticheskogo seminara "Volokna i voloknistye materialy spetsial'nogo naznacheniya. Issledovaniya i razrabotki" = Collection of reports of the scientific-practical seminar "Fibers and fibrous materials for special purposes. Research and development", Minsk, 14 July 2015, pp. 4–6 [In Russian].

Prokopchuk, N.R. and Prishchepenko, D.V. [2022]. Production of chitosan nanofibers modified with metal nanoparticles [Poluchenie nanovolokon khitozana, modifitsirovannykh nanochastitsami metallov]. *Materialy V Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke "Neftegazokhimiya – 2022" = Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Refining "Petrochemistry – 2022"*, Minsk, 2–4 November 2022, pp. 159–161 [In Russian].

Ryklin, D.B., Demidova, M.A. and Karnilov, M.S. [2024a]. Evaluation of water vapor permeability of wound dressings with nanofiber coating [Otsenka paropronitsaemosti ranevykh povyazok s nanovoloknistym pokrytiem]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik of the Vitebsk State Technological University*, vol. 2, no. 48, pp. 18–27 [In Russian].

Ryklin, D.B., Demidova, M.A. and Karnilov, M.S. [2024b]. The effect of interelectrode distance on the morphology of electrospun nanofibrous materials [Vliyanie mezhelektrodnogo rasstoyaniya na morfologiyu elektroformovannykh nanovoloknistykh materialov]. *Sovremennye inzhenernye problemy v proizvodstve tovarov narodnogo potrebleniya: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo simpoziuma IV Mezhdunarodnogo Kosyinskogo Forumu «Problemy inzhenernykh nauk: formirovanie tekhnologicheskogo suvereniteta» = Modern engineering problems in the production of consumer goods: collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Symposium of the 4th International Kosygin Forum "Problems of Engineering Sciences: Formation of Technological Sovereignty"*, vol. 1, pp. 283–287 [In Russian].

Ryklin, D.B., Karnilov, M.S. and Demidova, M.A. [2025]. Influence of the composition of the spinning solution of chitosan and polyvinyl alcohol on the modes of the electrospinning process [Vliyanie sostava pryadil'nogo rastvora khitozana i polivinilovogo spirta na rezhimy protsessa elektroformovaniya]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Sovremennye ekologicheski chistye innovatsionnye tekhnologii polucheniya novykh funktsional'nykh polimernykh voloknistykh i nanomaterialov (Kostandovskie chteniya)» = Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern environmentally friendly innovative technologies for producing new functional polymeric fibrous and nanomaterials (Kostandov Readings)"*, Moscow, 26–27 November 2025, pp. 154–157 [In Russian].

Sedanova, A.V., Kornienko, N.V., P'yanova, L.G., Delyagina, M.S. and Lavrenov, A.V. [2025]. Effect of amino acid additives on the properties of carbon sorbent modified with salicylic acid [Vliyanie dobavok aminokislot na svoystva uglerodnogo sorbenta, modifitsirovannogo salitsilovoy kislotoy]. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physicochemistry of Surfaces and Protection of Materials*, vol. 61, no. 1, pp. 3–10 [In Russian].

Ushmarov, D.I., Gumenyuk, S.E., Grigoriev, T.E., Shokel, O.Yu., Isyanova, D.R. and Chumakov, P.I. [2024]. Influence of chemical cross-linking with glutaraldehyde on the sorption parameters of chitosan-based wound dressings [Vliyanie khimicheskoy sshivki glutarovym al'degidom na sorbtsionnye parametry ranevykh pokrytiy na osnove khitozana]. *Meditinskiy vestnik Severnogo Kavkaza = Medical Bulletin of the North Caucasus*, vol. 19(3), pp. 243–246 [In Russian].

Stace, E.T., Mouthuy, P.A., Carr, A.J. and Ye, H.C. [2019]. Biomaterials: Electrospinning. *Comprehensive Biotechnology (Third Edition)*, vol. 5, pp. 424–441.

Tsygankov, P.Yu., Abramov, A.A., Bozorova, A.A., Evdokimova, S.A. and Menshutina, N.V. [2025]. Processes for obtaining hybrid alginate-chitosan aerogels and study of their antibacterial activity [Protsessy polucheniya gibridnykh aerogeley al'ginat-khitozana i issledovanie ikh antibakterial'noy aktivnosti]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern High Technologies. Regional Supplement*, vol. 83, part 3, pp. 132–139 [In Russian].

Wang, H.S. [2009]. Functional polymeric nanofibers from electrospinning. *Recent Patents on Nanotechnology*, vol. 3, pp. 21–31.

Wang, X., Shan, C., Huang, R., Penkova, A. and Su, R. [2025]. Chitosan and chitosan nanofibers in wound dressings, from material preparation to functional design: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 333, part 2, art. 148937.

Yu, H., Chen, D., Lu, W., Zhang, C., Wang, H., Peng, Z., Jiang, H. and Xiao, C. [2025]. Characterization of polyvinyl alcohol/chitosan nanofibers loaded with royal jelly by blending electrospinning for potential wound dressings. *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 307, Part 2, art. 141977.

Информация об авторах

Information about the authors

Карнилов Михаил Сергеевич

Ассистент кафедры «Информационные системы и технологии», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: alphamiha@mail.ru

Рыклин Дмитрий Борисович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническое регулирование и товароведение», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: ryklin-db@mail.ru

Меламед Владимир Дмитриевич

Кандидат медицинских наук, доцент кафедры хирургических болезней № 2, Гродненский государственный медицинский университет, Республика Беларусь.

E-mail: alllotransplan@mail.ru

Демидова Мария Александровна

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Маркетинг и финансы», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: demidova.mariya00@gmail.com

Mikhail S. Karnilau

Assistant of the Department "Information Systems and Technologies", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: alphamiha@mail.ru

Dzmitry B. Ryklin

Doctor of Science (in Engineering), Professor, Chair of the Department "Technical Regulation and Commodity Science", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: ryklin-db@mail.ru

Vladimir D. Melamed

Candidate of Sciences (in Medicine), Associate Professor of the Department of Surgical Diseases No. 2, Grodno State Medical University, Republic of Belarus.

E-mail: alllotransplan@mail.ru

Mariya A. Demidova

Candidate of Sciences (in Engineering), Senior Lecturer of the Department "Marketing and Finance", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: demidova.mariya00@gmail.com