

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 615.46.

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.002

ВОЛОКНИСТЫЕ СКАФФОЛДЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА, ХИТОЗАНА И ПОЛИКАПРОЛАКТОНА: ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА

**Анастасия Андреевна Брюзгина¹, Жэнь Дэюй², Олеся Александровна Лапуть³,
Ирина Александровна Курзина⁴**

^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

¹ bryuzgina2016@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6315-3341>

² rendeyu0620@gmail.com

³ olesyalaput@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5553-5983>

⁴ kurzina99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4976-2295>

Аннотация. В настоящей работе была проведена оптимизация параметров электроспиннинга прядильных водных растворов поливинилового спирта (ПВС), водно-уксусных растворов на основе ПВС и хитозана, а также скаффолдов структуры «ядро-оболочка» на основе поликапролактона (ПКЛ) и ПВС и исследование их физико-химических свойств. Установлено, что добавление хитозана в прядильный раствор ПВС способствует снижению среднего диаметра волокон с 0,61 мкм до 0,15 мкм композиционных скаффолдов относительно чистого ПВС, а также формированию более однородного распределения волокон. Обнаружено, что создание коаксиальной структуры «ядро-оболочка» повышает расход полимера, тем самым увеличивая толщину образующихся волокон до 1,62 мкм. Доказано, что формирование водородных связей между функциональными группами ПВС и хитозана существенно улучшает гидрофильные свойства поверхности скаффолдов, повышая их смачиваемость. Вместе с тем, анализ ИК-спектров коаксиальных образцов ПКЛ-ПВС выявил наличие плотного наружного слоя из ПКЛ, эффективно защищающего внутреннюю сердцевину из ПВС. Полученные результаты указывают на значительный научный вклад оптимизации технологических параметров процесса электроспиннинга композиционных скаффолдов на основе системы ПВС/хитозан и коаксиальных структур состава ПКЛ-ПВС, открывая перспективы для дальнейших исследований в области медицинского материаловедения.

Ключевые слова: скаффолды, поливиниловый спирт, хитозан, поликапролактон, коаксиальный электроспиннинг, регенеративная медицина

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-73-00280. Работа выполнена с использованием оборудования Томского регионально центра коллективного пользования ТГУ.

Для цитирования: Брюзгина А.А., Жэнь Д., Лапуть О.А., Курзина И.А. Волокнистые скаффолды на основе поливинилового спирта, хитозана и поликапролактона: параметры получения и свойства // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 2. С. 160-168. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.002.

Original article

FIBROUS SCAFFOLDS BASED ON POLYVINYL ALCOHOL, CHITOSAN AND POLYCAPROLACTONE: OPTIMIZATION OF FABRICATION PARAMETERS AND PROPERTIES

Anastasia A. Bryuzgina¹, Deyu Ren², Olesya A. Laput³, Irina A. Kurzina⁴

^{1,2,3,4} National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36, Tomsk, 634050, Russia

¹bryuzgina2016@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6315-3341>

²rendeyu0620@gmail.com

³olesyalaput@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5553-5983>

⁴kurzina99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4976-2295>

Abstract. In this work, the optimization of electrospinning parameters for aqueous solutions of polyvinyl alcohol (PVA), water-acetic acid-based solutions containing PVA and chitosan, as well as core-shell scaffolds based on polycaprolactone (PCL) and PVA was carried out along with investigation of their physicochemical properties. It has been established that adding chitosan to the spinning solution leads to a decrease in fiber diameter from 0.61 μm to 0.15 μm compared to pure PVA, while ensuring more uniform distribution of fibers. The formation of a coaxial «core-shell» structure increases polymer consumption, resulting in thicker fibers up to 1.62 μm . Hydrogen bond formation between functional groups of PVA and chitosan significantly improves hydrophilic surface properties of composite scaffolds by enhancing wettability. Furthermore, IR spectroscopy analysis revealed a dense outer layer of PCL effectively protecting the inner PVS core in coaxial PCL-PVS samples. These findings highlight significant scientific contribution made through optimizing technological parameters of electrospinning process for composite scaffolds based on PVA/chitosan system and coaxial structures composed of PCL/PVS, opening new perspectives for further research in medical materials science.

Keywords: scaffolds, polyvinyl alcohol, chitosan, polycaprolactone, coaxial electrospinning, regenerative medicine.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Science Foundation under Grant No. 25-73-00280. The research was done using equipment of Tomsk Regional Core Shared Research Facilities Centre of National Research Tomsk State University.

For citation: Bryuzgina A.A., Ren. D., Laput O.A., Kurzina I.A. (2026). Fibrous scaffolds based on polyvinyl alcohol and chitozan: optimization of fabrication parametrs and properties. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(2), 160-168. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.02.002.

Введение

Кожный покров является основным органом, наиболее уязвимым к различным повреждениям, следствием которых становится нарушение целостности ткани и формирование раневой поверхности [1]. Регенерация поврежденных участков представляет собой многоэтапный биологический механизм, характеризующийся активностью различных клеточных популяций, влиянием ростовых факторов и структурообразующих компонентов внеклеточной среды [2]. Современное материаловедение направлено на разработку раневых повязок комплексного действия, стимулирующих заживление и препятствующих образованию рубцов за счет самого материала или включенных в состав повязки биологически активных

соединений [3]. В частности, использование полимерных нетканых волокнистых материалов (скаффолдов), полученных методом электроспиннинга (ЭС), способных имитировать структуру внеклеточного матрикса, обеспечивают перспективные возможности для улучшения клинических результатов [4]. Скаффолды представляют собой востребованные материалы для разработки современных раневых покрытий благодаря своим уникальным свойствам: эффективному транспорту лекарств, способности поддерживать оптимальный водный баланс и обеспечивать взаимодействие с клетками эндотелия. ЭС – это простой, доступный и коммерчески применяемый метод получения скаффолдов с помощью высоковольтного электростатического поля [5]. Волокнистые скаффолды, получаемые методом ЭС, пред-

ставляют собой тонкие полимерные нити с нанометровым диаметром, которые формируют пористую структуру, сходную с ВКМ тканей [6]. Для создания волокон со специфической структурой и функциональными свойствами можно использовать различные методы ЭС, включая смешанный (blend), коаксиальный и микросольветный электроспиннинг. Коаксиальный электроспиннинг особенно популярен среди исследователей благодаря уникальной структуре «ядро-оболочка» получаемых изделий. Такая структура позволяет изолировать действующее вещество от контакта с окружающими клетками и тканями посредством наружной оболочки скаффолда, изготовленной из биосовместимого полимера, не оказывающего отрицательного влияния на организм. Сообщается, что коаксиальные скаффолды с оптимальной структурой получаются, когда полимеры ядра и оболочки несмешиваемы [7]. В качестве оболочки обычно используются полимеры с низкой растворимостью в водной среде, например, поликапролактон (ПКЛ), а в качестве ядра нановолокон – водорастворимые полимеры, такие как поливиниловый спирт (ПВС). В то время как оболочка защищает внутренний материал от деградации и регулирует скорость диффузии, ядро инкапсулирует лекарственное средство, что делает коаксиальные скаффолды особенно подходящими для систем доставки лекарств.

Комбинация синтетических и натуральных полимеров при односопловой системе ЭС широко применяются для производства композиционных скаффолдов, ускоряющих заживление ран. Хитозан (ХЗ) – натуральный гетерополисахарид с мукоадгезивными, антимикробными и биосовместимыми свойствами [8]. ЭС растворов хитозана затруднен ввиду его высокой кристалличности, наличия водородных связей в структуре полимера и плохой растворимости в органических растворителях, что приводит к высокой вязкости растворов и затрудняет воспроизводимость ЭС [9]. Поэтому при ЭС хитозана целесообразно использовать дополнительный полимер-носитель, например, ПВС [10]. ПВС широко используется при создании тканеинженерных матриц благодаря водорастворимости, нетоксичности, биосовместимости и биоразлагаемости, а также оптимальным механическим свойствам [11]. Сочетание данных полимеров создает синергетический эффект, благодаря которому полученные мате-

риалы не только обеспечивают прочность и эластичность изделия, но и эффективно участвуют в основных этапах заживления и ремоделировании тканей. Кроме того, оба полимера обладают гидрофильными свойствами и подвержены гидролизу, что обеспечивает биодеградируемость скаффолдов.

Целью данного исследования являлось создание и изучение физико-химических свойств однослойных и коаксиальных скаффолдов методом ЭС в качестве перспективных платформ для контролируемой доставки лекарственных препаратов при терапии кожных заболеваний.

Материалы и методы

Для изготовления экспериментальных образцов использовали гранулированный поли-(ε-капролактон) (Sigma-Aldrich, $M_w = 80$ тыс. г/моль, Китай), порошок ПВС (Qingdao Nuokang Environmental Protection Technology Co., Ltd., $M_w = 85$ кДа, Китай) и низкомолекулярного хитозана (Sigma-Aldrich, $M_w = 280$ кДа, Германия). Для получения однослойных скаффолдов был приготовлен водный раствор ПВС с концентрацией 9 масс.%. Для этого рассчитанное количество порошка ПВС добавляли в горячую воду с температурой 110°C и перемешивали в течение 2 часов. Затем был приготовлен смешанный раствор ПВС (8 масс.%) и хитозана (ХЗ): к раствору ПВС было добавлено рассчитанное количество ХЗ и раствор уксусной кислоты, температура и время перемешивания растворов были снижены до 80°C и 1 часа соответственно. Массовые соотношения компонентов ПВС/хитозан в растворе составили 5:2. Для изготовления коаксиальных скаффолдов готовили 18% масс. раствора ПКЛ в хлороформе и 10% масс. раствора ПВС в воде.

Экспериментальные образцы изготавливали методом ЭС путем распыления прядильных растворов на вращающийся цилиндрический коллектор лабораторной установки (Томский Государственный университет, Томск, Россия). В таблице 1 указаны рабочие параметры проведения ЭС и маркировка экспериментальных образцов.

Таблица 1. Параметры электроспиннинга для получения экспериментальных образцов

Table 1. Electrospinning parameters for obtaining experimental samples

Образец Параметр	ПВС	ПВС-ХЗ	ПКЛ-ПВС
$U, \text{кВ}$	32	34	31
$Q, \text{мл/ч}$	2	1,5	раствор оболочки – 2,0
			раствор сердцевины – 1,8
$D, \text{см}$	15		
$\omega, \text{об/мин}$	150		

Примечание: U – приложенное напряжение, кВ; Q – скорость подачи прядильного раствора, мл/ч; D – расстояние от иглы до коллектора, см, мкс; ω – скорость вращения коллектора, об/мин.

Коаксиальный ЭС проводился с использованием составного сопла, при этом растворы для сердцевины и оболочки подавались на коаксиальные внутреннюю и внешнюю иглы соответственно. Для растворов оболочки и сердцевины использовались коаксиальные сопла 15-го калибра (внутренний диаметр 1,6 мм) и 20-го калибра (внутренний диаметр 0,838 мм). Полученные материалы осаждали на цилиндрическом коллекторе, покрытом фольгой.

Анализ структуры поверхности экспериментальных образцов проводился с применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью системы с электронным и сфокусированными пучками Quanta 200 3D (Томский материаловедческий центр коллективного пользования, Томск, Россия) при ускоряющем напряжении 5-20 кВ с размером пятна 40 мкА/мкм². Для осуществления компенсации заряда с поверхности образцов перед исследованием наносили токопроводящее золотое по-

крытие толщиной 2-5 нм методом магнетронного распыления.

Химический состав скаффолдов исследовали с помощью ИК-Фурье спектроскопии. ИК-спектры поглощения образцов регистрировали на ИК-Фурье спектрометре « Cary 600 » (Agilent Technologies) с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) (материал призмы ZnSe) в области 4000–400 см⁻¹.

Исследование контактных свойств поверхности материалов проводили на установке для измерения краевого угла смачивания DSA25 (KRUSS, Германия) с помощью программного обеспечения «ADVANCE» (KRUSS, Германия). Смачиваемость поверхности оценивали методом лежащей капли с использованием двух контактных жидкостей – глицерина и дийодметана. Расчет поверхностной энергии производили на основе измеренных краевых углов смачивания согласно модели Оуэнса – Вендта – Рабеля – Кельбле [12].

Результаты и их обсуждение

Оптимизация параметров ЭС позволила успешно сформировать волокнистые структуры как для растворов чистого ПВС, так и для композиционных скаффолдов на основе ПВС и хитозана, включая коаксиальные скаффолды ПКЛ-ПВС. И однослойные, и коаксиальные скаффолды состоят из однородных волокон с минимальным количеством дефектов (рис.1). Для однослойных скаффолдов ПВС средний диаметр волокон составил 0,61 мкм (рис.1а). Введение хитозана в прядильный раствор ПВС в объемном соотношении 5:2 дополнительно уменьшило диаметр волокон примерно до 0,15 мкм (рис.1б), при этом улучшив однородность структуры материалов. Для коаксиальных скаффолдов ПКЛ-ПВС значение диаметра волокон составило 1,62 мкм, что как было показано, способствует максимальной пролиферации дермальных фибробластов [13], [14]. Формирование внутренней и наружной оболочки скаффолдов требует большего объема полимерного раствора, что закономерно ведет к увеличению размеров волокна по сравнению с однослойными скаффолдами.

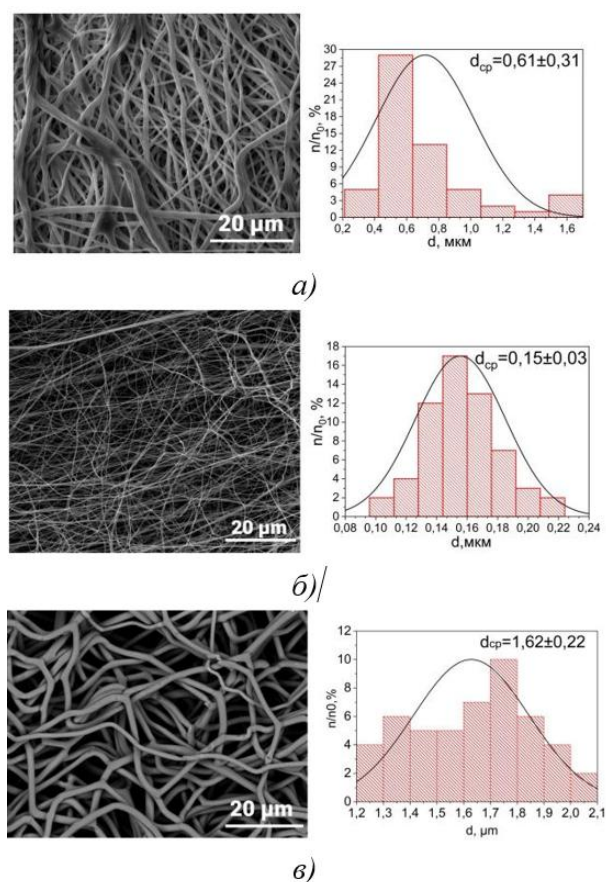


Рис. 1. СЭМ изображения поверхности волокон экспериментальных скаффолдов: а) ПВС; б) ПВС-ХЗ; в) ПКЛ-ПВС

Fig.1. SEM images of the fiber surface of experimental scaffolds: a) PVA; b) PVA-Chitosan; c) PCL-PVA

Для оценки возможных химических взаимодействий между компонентами полученных скаффолдов был проведен анализ ИК-спектров. Скаффолды на основе ПВС характеризуются наличием основных сигналов, включающих широкую полосу в области $3200\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, обусловленную растяжением гидроксильных (--OH) групп, что свидетельствует о наличии водородных связей между молекулами ПВС и молекулами воды (рис. 2). В области $2900\text{--}2950\text{ см}^{-1}$ наблюдаются полосы, соответствующие валентным колебаниям C--H связей метиленовых групп ($\text{--CH}_2\text{--}$). Сигналы в диапазоне $1000\text{--}1150\text{ см}^{-1}$ связаны с колебаниями C--O--C и C=O валентных связей эфирных и гидроксильных групп ПВС. В системе ПВС/хитозан наблюдается постепенное смещение полосы карбонильных групп ПВС (около 1710 см^{-1}) в сторону более низких частот, что подтверждает взаимо-

действие между карбонильными функциональными группами ПВС и амидными группами хитозана. ИК-спектры коаксиальных скаффолдов ПКЛ-ПВС характеризуются наличием характерных полос, специфичных только для оболочки из ПКЛ, при одновременном отсутствии сигналов, характерных для сердцевины из ПВС. Это однозначно доказывает сплошное покрытие скаффолда внешней оболочкой из ПКЛ, что согласуется с результатами других исследователей [15], [16]. Типичные характеристические полосы для спектра ПКЛ представлены следующими значениями: двойной сигнал при 2940 см^{-1} и 2864 см^{-1} , соответствующий асимметричному растяжению метиленовых групп ($\text{--CH}_2\text{--}$); интенсивный узкий пик на частоте 1721 см^{-1} , связанный с колебаниями карбонильной группы (C=O); полоса на 1294 см^{-1} , относящаяся к деформационным колебаниям связей C--O и C--C ; а также сигнал на 1240 см^{-1} , характеризующий асимметричные колебания эфирной связи C--O--C .

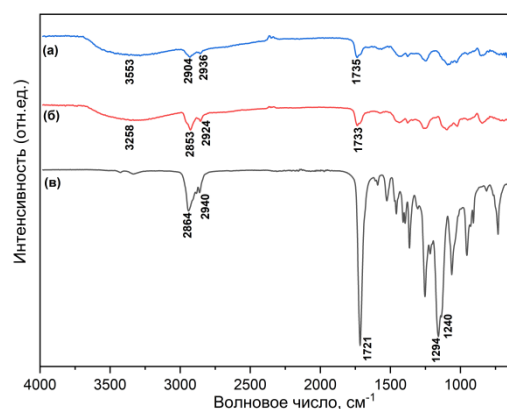


Рис. 2. ИК-спектры экспериментальных скаффолдов: а) ПВС; б) ПВС-ХЗ; в) ПКЛ-ПВС

Fig. 2. IR spectra of experimental scaffold materials: a) PVA; b) PVA-Chitosan; c) PCL-PVA

Образование водородных комплексов в скаффолдах ПВС/хитозан влияет на смачиваемость поверхности, что важно для впитывания раневых жидкостей и поддержания уровня влаги [17]. Образец ПВС показал значение $\text{KWC} = 63,1 \pm 3,2^\circ$ при контакте с глицерином и $24,6 \pm 1,2^\circ$ при контакте с дийодметаном, что свидетельствует о выраженных гидрофильных свойствах поверхности материалов (таб. 2). Скаффолды на основе ПВС с добавлением хитозана характеризовались меньшими значениями KWC : $57,9 \pm 2,9^\circ$ при контакте с глицерином

и $20,5 \pm 1,1^\circ$ при контакте с дийодметаном, что говорит о значительном повышении гидрофильных свойств поверхности при введении хитозана в состав скаффолдов. Напротив, коаксиальные скаффолды ПКЛ-ПВС характеризуются повышенными значениями КУС – $114,4 \pm 5,7^\circ$ при контакте с глицерином и $116,5 \pm 5,8^\circ$ при контакте с дийодметаном, что обусловлено наличием гидрофобного компонента – ПКЛ, создающего наружный слой, затрудняющий проникновение молекул жидкости. Высокая гидрофобность в данном случае не является недостатком, поскольку такая характеристика важна для контроля скорости высвобождения активных веществ и защиты внутренней структуры материала от преждевременного разрушения.

Таблица 2. Значения КУС экспериментальных скаффолдов

Table 2. Values of contact angle for experimental scaffolds

Образец	Краевой угол смачивания, град.	
	Глицерин	Дийодметан
ПВС	$63,1 \pm 3,2$	$24,6 \pm 1,2$
ПВС-хитозан	$57,9 \pm 2,9$	$20,5 \pm 1,1$
ПКЛ-ПВС	$114,4 \pm 5,7$	$116,5 \pm 5,8$

Незначительное увеличение значений ПЭ у скаффолдов ПВС/хитозан до значения $49,2$ мН/м по сравнению со скаффолдами на основе чистого ПВС ($47,1$ мН/м) коррелирует с уменьшением значения КУС (рис. 3). Хитозан, будучи гидрофильным полимером с аминогруппами в составе, способствует формированию более полярной и энергетически «активной» поверхности, что положительно влияет на взаимодействие с биологическими жидкостями. Как и ожидалось, наименьшим значение ПЭ обладают коаксиальные скаффолды ПКЛ-ПВС ($6,1$ мН/м), что указывает на гидрофобную природу слоя оболочки.

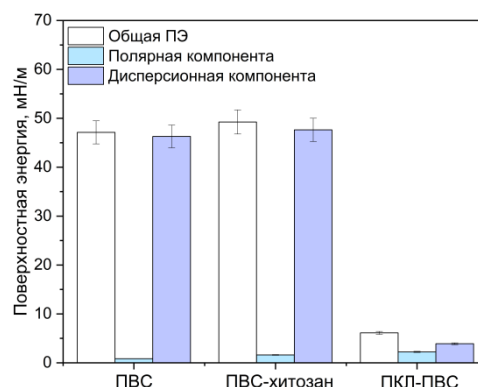


Рис. 3. Поверхностная энергия экспериментальных скаффолдов

Fig. 3. Surface energy of experimental scaffolds

Выводы

В рамках данного исследования были подобраны оптимальные параметры электроспиннинга для получения однослойных скаффолдов из ПВС, композиционных скаффолдов на основе ПВС/хитозана и коаксиальных скаффолдов ПКЛ-ПВС, а также выполнено сравнительное изучение их физико-химических свойств. Проведённые исследования позволили выявить взаимосвязь между составом материалов, типом электроспиннинга и соответствующими характеристиками поверхности, такими как гидрофильность и морфология, что создаёт научную основу для дальнейших разработок волокнистых материалов с заранее заданными свойствами.

1. Показано, что оптимизация параметров электроспиннинга позволила успешно сформировать волокнистые структуры как для растворов чистого ПВС, так и для композиционных скаффолдов на основе ПВС и хитозана, включая коаксиальные скаффолды ПКЛ-ПВС. Введение хитозана в прядильный раствор способствовало увеличению диаметра волокон и повышению однородности структуры материалов. Использование коаксиального ЭС для создания структур «ядро-оболочка» ведет к закономерному утолщению волокон вследствие суммирования объемов подаваемых полимерных фаз.

2. Установлено, что в ИК-спектрах скаффолдов ПВС/хитозан присутствуют водородные связи как между ПВС и водой, так и между компонентами композита. Наличие хитозана в системе вызывает смещение амидных и карбонильных полос в ИК-спектрах, что подтвер-

ждает формирование водородных связей между аминогруппами хитозана и карбонильными группами ПВС. Полосы на ИК-спектрах коаксиальных скаффолдов ПКЛ-ПВС свидетельствуют о наличии сплошной оболочки из ПКЛ, при этом отсутствуют характерные сигналы сердцевин из ПВС, что указывает на однородное покрытие скаффолдов внешним слоем из ПКЛ.

3. Образование водородных связей в скаффолдах ПВС/хитозан заметно улучшает смачиваемость поверхности – значения КУС составили $57,9 \pm 2,9^\circ$ при контакте с глицерином и $20,5 \pm 1,1^\circ$ при контакте с дийодметаном. Коаксиальные скаффолды ПКЛ-ПВС обладают гидрофобной поверхностью, что обусловлено наружным слоем ПКЛ и служит важным фактором для контролируемого высвобождения лекарственных агентов и сохранения стабильности внутренней структуры материала.

Список литературы

- Hussein Y., El-Fakharany E.M., Kamoun E.A., Loutfy S.A., Amin R., Taha T.H., Salim S.A., Amer M. Electrospun PVA/hyaluronic acid/L-arginine nanofibers for wound healing applications: nanofibers optimization and in vitro bioevaluation. // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2020. – Vol. 164. – P. 667–676. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.126>
- El-Aassar M.R., Ibrahim O.M., Fouda M.M.G., El-Beheri N.G., Agwa M.M. Wound healing of nanofiber comprising Polygalacturonic/Hyaluronic acid embedded silver nanoparticles: in-vitro and in-vivo studies. // *Carbohydrate Polymers*. – 2020. – Vol. 238. – P. 116175. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116175>
- Saghazadeh S., Rinoldi C., Schot M., Kashaf S.S., Sharifi F., Jalilian E., Nuutila K., Giatsidis G., Mostafalu P., Derakhshandeh H., Yue K., Swieszkowski W., Memic A., Tamayol A., Khademhosseini A. Drug delivery systems and materials for wound healing applications. // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2018. – Vol. 127. – P. 138–166. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2018.04.008>
- Saghazadeh S., Rinoldi C., Schot M., Kashaf S.S., Sharifi F., Jalilian E., Nuutila K., Giatsidis G., Mostafalu P., Derakhshandeh H., Yue K., Swieszkowski W., Memic A., Tamayol A., Khademhosseini A. Drug delivery systems and materials for wound healing applications. // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2018. – Vol. 127. – P. 138–166. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2018.04.008>
- Sapalidis A.A. Porous Polyvinyl Alcohol Membranes: Preparation Methods and Applications. // *Symmetry*. – 2020. – Vol. 12, № 6. – P. 960. <https://doi.org/10.3390/sym12060960>
- Antaby E., Klinkhammer K., Sabantina L. Electrospinning of chitosan for antibacterial applications—current trends. // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, № 24. – P. 11937. <https://doi.org/10.3390/app112411937>
- Verčimáková K., Karbowniczek J., Sedlář M., Stachewicz U., Vojtová L. The role of glycerol in manufacturing freeze-dried chitosan and cellulose foams for mechanically stable scaffolds in skin tissue engineering. // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – Vol. 275. – P. 133602. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133602>
- Seifi S., Shamloo A., Kheirkhah Barzoki A., Bakhtiari M.A., Zare S., Cheraghi F., Peyrovan A. Engineering biomimetic scaffolds for bone regeneration: Chitosan/alginate/polyvinyl alcohol-based double-network hydrogels with carbon nanomaterials. // *Carbohydrate Polymers*. – 2024. – Vol. 339. – P. 122232. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122232>
- Parisi D., Ditillo C.D., Han A., Lindberg S., Hamersky M.W., Colby R.H. Rheological investigation on the associative properties of poly(vinyl alcohol) solutions. // *Journal of Rheology (New York, N.Y.)*. – 2022. – Vol. 66, № 6. – P. 1141–1150. <https://doi.org/10.1122/8.0000435>
- Cui C., Sun H., Wang Y., Li X., Zhao H., Tang C. Electrospun chitosan nanofibers for wound healing application. // *Engineered Regeneration*. – 2021. – Vol. 2. – P. 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2021.08.001>
- Mata G.C., Araújo P.H.H., Costa T.M.H., Franca R.P., Cavalcante L.C.D.A. Composition effects on the morphology of PVA/chitosan electrospun nanofibers. // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, № 22. – P. 4856. <https://doi.org/10.3390/polym14224856>
- Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers. // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1969. – Vol. 13, № 8. – P. 1741–1747. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>
- P. Rezvani Ghomi E, Khosravi F, Neisiany RE, Shakiba M, Zare M, Lakshminarayanan R, Chellappan V, Abdouss M, Ramakrishna S. Advances in electrospinning of aligned nanofiber scaffolds used for wound dressings. // *Curr Opin Biomed Eng*. – 2022. – Vol. 22. – P.100393. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>

14. Hodgkinson T, Yuan X-F, Bayat A. Electrospun silk fibroin fiber diameter influences in vitro dermal fibroblast behavior and promotes healing of ex vivo wound models. *J Tissue Eng.* // 2014. – Vol. 5. – P. 2041731414551661. <https://doi.org/10.1007/s42765-022-00216-w>.

15. Moradipour P. et al. Core-shell nanofibers based on polycaprolactone/polyvinyl alcohol and polycaprolactone/collagen for biomedical applications // *Journal of Pharmaceutical Innovation.* – 2022. – Т. 17. – №. 3. – С. 911-920.

<https://doi.org/10.1007/s12247-021-09568-z>.

16. Tanha N. R., Nouri M. Core-shell nanofibers of silk fibroin/polycaprolactone-clindamycin: Study on nanofibers structure and controlled release behavior // *Polymer Science, Series A.* – 2019. – Т. 61. – №. 1. – С. 85-95.

<https://doi.org/10.1134/S0965545X19010085>.

17. Ajmal G., Bonde G.V., Mittal P., Khan G., Pandey V.K., Bakade B.V., Mishra B. Biomimetic PCL-gelatin based nanofibers loaded with ciprofloxacin hydrochloride and quercetin: a potential antibacterial and anti-oxidant dressing material for accelerated healing of a full thickness wound. // *International Journal of Pharmaceutics.* – 2019. – Vol. 567. – P. 118480. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118480>.

Информация об авторах

А. А. Брюзгина – аспирант, младший научный сотрудник центра исследований в области материалов и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета.

Д. Жэнь – магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета.

О. А. Лапуть – кандидат технических наук, старший научный сотрудник центра исследований в области материалов и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета, старший преподаватель кафедры природных соединений, фармацевтической и медицинской химии Национального исследовательского Томского государственного университета.

И. А. Курзина – доктор физико-математических наук, доцент, директор центра исследований в области материалов и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета, заведующий кафедрой природных соединений, фармацевтической и медицинской химии Национального исследовательского Томского государственного университета.

References

1. Hussein Y., El-Fakharany E.M., Kamoun E.A., Loutfy S.A., Amin R., Taha T.H., Salim S.A., Amer M. Electrospun PVA/hyaluronic acid/L-arginine nanofibers for wound healing applications: nanofibers optimization and in vitro bioevaluation. // *International Journal of Biological Macromolecules.* – 2020. – Vol. 164. – P. 667–676.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.126>.

2. El-Aassar M.R., Ibrahim O.M., Fouda M.M.G., El-Beheri N.G., Agwa M.M. Wound healing of nanofiber comprising Polygalacturonic/Hyaluronic acid embedded silver nanoparticles: in-vitro and in-vivo studies. // *Carbohydrate Polymers.* – 2020. – Vol. 238. – P. 116175. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116175>.

3. Saghazadeh S., Rinoldi C., Schot M., Kashaf S.S., Sharifi F., Jalilian E., Nuutila K., Giatsidis G., Mostafalu P., Derakhshandeh H., Yue K., Swieszkowski W., Memic A., Tamayol A., Khademhosseini A. Drug delivery systems and materials for wound healing applications. // *Advanced Drug Delivery Reviews.* – 2018. – Vol. 127. – P. 138–166. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2018.04.008>.

4. Saghazadeh S., Rinoldi C., Schot M., Kashaf S.S., Sharifi F., Jalilian E., Nuutila K., Giatsidis G., Mostafalu P., Derakhshandeh H., Yue K., Swieszkowski W., Memic A., Tamayol A., Khademhosseini A. Drug delivery systems and materials for wound healing applications. // *Advanced Drug Delivery Reviews.* – 2018. – Vol. 127. – P. 138–166. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2018.04.008>.

5. Sapolidis A.A. Porous Polyvinyl Alcohol Membranes: Preparation Methods and Applications. // *Symmetry.* – 2020. – Vol. 12, № 6. – P. 960. <https://doi.org/10.3390/sym12060960>.

6. Antaby E., Klinkhammer K., Sabantina L. Electrospinning of chitosan for antibacterial applications—current trends. // *Applied Sciences.* – 2021. – Vol. 11, № 24. – P. 11937. <https://doi.org/10.3390/app112411937>.

7. Verčimáková K., Karbowiczek J., Sedlář M., Stachewicz U., Vojtová L. The role of glycerol in manufacturing freeze-dried chitosan and cellulose foams for mechanically stable scaffolds in skin tissue engineering. // *International Journal of Biological Macromolecules.* – 2024. – Vol. 275. – P. 133602. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133602>.

8. Seifi S., Shamloo A., Kheirkhah Barzoki A., Bakhtiari M.A., Zare S., Cheraghi F., Peyrovan A. Engineering biomimetic scaffolds for bone re-

- generation: Chitosan/alginate/polyvinyl alcohol-based double-network hydrogels with carbon nanomaterials. // *Carbohydrate Polymers*. – 2024. – Vol. 339. – P. 122232. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122232>.
9. Parisi D., Ditillo C.D., Han A., Lindberg S., Hamersky M.W., Colby R.H. Rheological investigation on the associative properties of poly(vinyl alcohol) solutions. // *Journal of Rheology (New York, N.Y.)*. – 2022. – Vol. 66, № 6. – P. 1141–1150. <https://doi.org/10.1122/8.0000435>.
10. Cui C., Sun H., Wang Y., Li X., Zhao H., Tang C. Electrospun chitosan nanofibers for wound healing application. // *Engineered Regeneration*. – 2021. – Vol. 2. – P. 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2021.08.001>.
11. Mata G.C., Araújo P.H.H., Costa T.M.H., Franca R.P., Cavalcante L.C.D.A. Composition effects on the morphology of PVA/chitosan electrospun nanofibers. // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, № 22. – P. 4856. <https://doi.org/10.3390/polym14224856>.
12. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers. // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1969. – Vol. 13, № 8. – P. 1741–1747. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>.
13. P. Rezvani Ghomi E, Khosravi F, Neisiany RE, Shakiba M, Zare M, Lakshminarayanan R, Chellappan V, Abdouss M, Ramakrishna S. Advances in electrospinning of aligned nanofiber scaffolds used for wound dressings. // *Curr Opin Biomed Eng*. – 2022. – Vol. 22. – P.100393. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>.
14. Hodgkinson T, Yuan X-F, Bayat A. Electrospun silk fibroin fiber diameter influences in vitro dermal fibroblast behavior and promotes healing of ex vivo wound models. *J Tissue Eng*. // 2014. – Vol. 5. – P. 2041731414551661. <https://doi.org/10.1007/s42765-022-00216-w>.
15. Moradipour P. et al. Core-shell nanofibers based on polycaprolactone/polyvinyl alcohol and polycaprolactone/collagen for biomedical applications // *Journal of Pharmaceutical Innovation*. – 2022. – Vol. 17, №. 3. – P. 911-920. <https://doi.org/10.1007/s12247-021-09568-z>.
16. Tanha N. R., Nouri M. Core-shell nanofibers of silk fibroin/polycaprolactone-clindamycin: Study on nanofibers structure and controlled release behavior // *Polymer Science, Series A*. – 2019. – Т. 61. – №. 1. – С. 85-95. <https://doi.org/10.1134/S0965545X19010085>.
17. Ajmal G., Bonde G.V., Mittal P., Khan G., Pandey V.K., Bakade B.V., Mishra B. Biomimetic PCL-gelatin based nanofibers loaded with ciprofloxacin hydrochloride and quercetin: a potential antibacterial and anti-oxidant dressing material for accelerated healing of a full thickness wound. // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2019. – Vol. 567. – P. 118480. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118480>.

Information about the authors

A. A. Bryuzgina – Postgraduate student, Junior Researcher of the Center for Research in Materials and Technologies of the National Research Tomsk State University.

D. Ren – master`s student of the National Research Tomsk State University.

O. A. Laput – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Center for Research in Materials and Technologies of the National Research Tomsk State University, Senior Lecturer at the Department of Natural Compounds, Pharmaceutical and Medical Chemistry of the National Research Tomsk State University.

I. A. Kurzina – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Director of the Center for Research in Materials and Technologies of the National Research Tomsk State University, Head of the Department of Natural Compounds, Pharmaceutical and Medical Chemistry of the National Research Tomsk State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 01.06.2026.

The article was received by the editorial board on 30 Jan. 2026; approved after reviewing 25 May 2026; accepted for publication 01 Jun. 2026.