

ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ АЭРОГЕЛЕЙ АЛЬГИНАТ-ХИТОЗАН И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

Цыганков П.Ю., Абрамов А.А., Бозорова А.А., Евдокимова С.А., Меньшутина Н.В.

Цыганков Павел Юрьевич (ORCID 0000-0003-2630-3838), Абрамов Андрей Александрович (ORCID 0000-0002-7079-0672), Бозорова Алина Абдурасуловна (ORCID 0000-0002-4808-5002), Евдокимова Светлана Александровна, Меньшутина Наталья Васильевна (0000-0001-7806-1426)
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
г. Москва, Россия. 125047, Московская область, г. Москва, Миусская площадь, 9.
E-mail: pavel.yur.tsygankov@gmail.com, abramovandrey516@gmail.com, bozorovaal@yandex.ru

*Гибридные аэрогели на основе биополимеров представляют собой перспективные материалы для биомедицинских применений благодаря уникальной контролируемой пористой структуре, биосовместимости. Широкое распространение получили такие биополимеры, как альгинат и хитозан, однако, их индивидуальные аэрогели зачастую обладают ограниченной стабильностью, низкой антибактериальной активностью. В данной работе разработан новый метод получения гибридных аэрогелей альгинат-хитозан, направленный на преодоление этих ограничений. Предложенный подход позволяет получить материалы с высокой удельной поверхностью (до 273 м²/г), объемом мезопор (до 1,37 см³/г) и антибактериальной активностью в отношении *Staphylococcus epidermidis* и *Escherichia coli*. Разработанные гибридные аэрогели могут быть использованы в качестве изделий медицинского назначения (раневые покрытия, имплантаты) и систем доставки лекарственных средств. Исследование вносит вклад в разработку экологически безопасных материалов, актуальных для решения задач медицины и фармацевтики, и предоставляет основу для дальнейшей оптимизации функциональных свойств гибридных аэрогелей на основе биополимеров.*

Ключевые слова: аэрогель, альгинат натрия, хитозан, структура, сверхкритические флюиды, антибактериальная активность

PROCESSES OF OBTAINING HYBRID ALGINATE-CHITOSAN AEROGELS AND STUDY OF THEIR ANTIBACTERIAL ACTIVITY

Tsygankov P.Y., Abramov A.A., Bozorova A.A., Evdokimova S.A., Menshutina N.V.

Tsygankov Pavel Yuryevich (ORCID 0000-0003-2630-3838), Abramov Andrey Alexandrovich (ORCID 0000-0002-7079-0672), Bozorova Alina Abdurasulovna (ORCID 0000-0002-4808-5002), Evdokimova Svetlana Alexandrovna, Menshutina Natalya Vasilievna (0000-0001-7806-1426)
Russian University of Chemical Technology DI. Mendeleev,
Moscow, Russia. 125047, Moscow region, Moscow, Miusskaya square, 9.
E-mail: pavel.yur.tsygankov@gmail.com, abramovandrey516@gmail.com, bozorovaal@yandex.ru

*Hybrid aerogels based on biopolymers are promising materials for biomedical applications due to their unique controlled porous structure and biocompatibility. Biopolymers such as alginate and chitosan have become widespread; however, their individual aerogels often have limited stability and low antibacterial activity. In this paper, a new method for obtaining hybrid alginate-chitosan aerogels aimed at overcoming these limitations has been developed. The proposed approach allows obtaining materials with a high specific surface area (up to 273 m²/g) and mesopore volume (up to 1.37 cm³/g) and antibacterial activity against *Staphylococcus epidermidis* and *Escherichia coli*. The developed hybrid aerogels can be used as medical devices (wound dressings, implants) and drug delivery systems. The study contributes to the development of environmentally friendly materials relevant for solving problems in medicine and pharmaceuticals, and provides a basis for further optimization of the functional properties of hybrid aerogels based on biopolymers.*

Keywords: aerogel, sodium alginate, chitosan, structure, supercritical fluids, antibacterial activity

ВВЕДЕНИЕ

Современные биоматериалы на основе природных полимеров, таких как альгинат и хитозан, активно исследуются благодаря биосовместимости, биоразлагаемости и низкой токсичности [1, 2]. Данные свойства делают их перспективными для применений в медицине, биотехнологии и фармацевтике. Особый интерес представляют гибридные системы, на основе полиэлектролитного комплекса альгината и хитозана, которые позволяют регулировать механические характеристики, пористую структуру и скорость высвобождения активных веществ [3]. Получение высокопористых материалов – аэрогелей, на основе таких гибридных систем является перспективной задачей. Аэрогели высокопористые наноструктурированные твердые материалы, характеризующиеся низкой плотностью и большой удельной поверхностью. Ключевую роль при получении аэрогелей играет сверхкритическая сушка [4], обеспечивающая сохранение мезопористой структуры с высокой удельной поверхностью (до 260–400 м²/г), что критично как для эффективной сорбции и контролируемого высвобождения лекарственных средств, так и для разработки высокопористых каркасов в регенеративной медицине. Наиболее распространенным сушильным агентом для проведения процесса сушки является сверхкритический CO₂ (критические параметры: температура - 304.1 К, давление - 7.37 МПа).

В ходе процесса сушки происходит диффузионное замещение растворителя внутри геля на сверхкритический диоксид углерода. По завершении процесса давление снижается и диоксид углерода переходит в газообразное состояние, а исходная структура геля остается без изменений [5]. Аэрогели на основе биополимеров перспективны для разработки изделий медицинского назначения (раневые покрытия, имплантаты) и систем доставки лекарственных средств.

В качестве раневых покрытий аэрогели и изделия на их основе эффективно впитывают экссудат и предотвращают инфицирование раны.

Так, показано, что повязки на основе альгинатных аэрогелей способны останавливать кровотечение (обладают гемостатическим действием) и проявляют антибактериальную активность по отношению к Золотистому стафилококку – одному из основных возбудителей гнойных раневых инфекций [6]. Материалы на основе альгинатных аэрогелей ускоряли заживление и снижали риск осложнений. Инфекция имплантатов (например, суставных протезов, катетеров) часто вызвана образованием бактериальных биопленок на их по-

верхности. Наиболее распространенными возбудителями инфекций медицинских изделий являются коагулазонегативные стафилококки, типичный пример – *Staphylococcus epidermidis* [7].

Разработка покрытий и пористых каркасов на основе аэрогелей для имплантатов с антибактериальными свойствами позволяет получить изделия медицинского назначения, предотвращающие колонизацию бактериями. Аэрогель на поверхности импланта может препятствовать образованию биопленки и тем самым предупреждать хроническое воспаление вокруг имплантата.

Аэрогели на основе биополимеров рассматриваются в фармацевтике как инновационные носители лекарственных средств, в том числе для антисептиков и антибиотиков [8]. Благодаря большой внутренней поверхности и развитой открытой структуре мезопор, аэрогель обладает высокой сорбционной емкостью по отношению к действующим веществам и способен обеспечивать пролонгированное высвобождение. Так, разработаны гибридные аэрогели для ингаляционной, пероральной, трансдермальной доставки [9].

Таким образом, биополимерные аэрогели на основе альгината и хитозана, обладающие высокой сорбционной емкостью, биосовместимостью, способностью к функционализации, востребованы в медицине и фармацевтике. Однако, для ряда применений существующие методы получения не обеспечивают однородность структуры гибридных аэрогелей альгинат-хитозан [10].

Кроме того, более глубокого исследования требует вопрос антибактериальной активности таких материалов. Это обуславливает интерес к разработке новых типов гибридных биополимерных аэрогелей и исследованию их антибактериальной активности.

Целью данного исследования является получение гибридных аэрогелей на основе полиэлектролитного комплекса альгинат-хитозан, исследование структурных свойств материалов и антибактериальной активности по отношению к *Staphylococcus epidermidis* и *Escherichia coli*.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ

На рис. 1 представлена методика получения гибридных аэрогелей на основе полиэлектролитного комплекса альгинат-хитозан.

Хитозан заданной концентрации растворяется в 0.5 М растворе HCl. Исследовались следующие концентрации хитозана 0.25, 0.5, 1, 2 масс%. Альгинат натрия (2 масс%) растворяется в воде. Раствор альгината натрия вводится в раствор хитозана с использованием шприцевого насоса.



Рис. 1. Методика получения гибридных аэрогелей на основе полиэлектролитного комплекса альгинат-хитозан

Fig. 1. The method for obtaining hybrid aerogels based on the polyelectrolyte complex alginate-chitosan

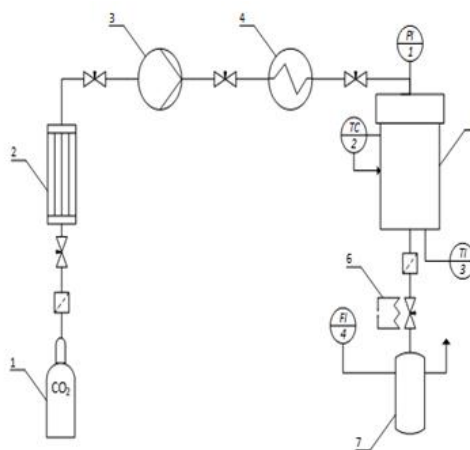
Были получены образцы с массовым соотношением альгинат натрия: хитозан (Alg:Chi) 1:0.125; 1:0.25; 1:0.5; 1:1. В результате протекания реакции между карбоксильными группами ($-\text{COO}^-$) альгината и протонированными аминогруппами ($-\text{NH}_3^+$) хитозана формируются сферические частицы. Частицы выдерживаются в растворе хитозана в течение 24 часов для завершения процесса сшивки. Полученные частицы многократно промываются водой для удаления непрореагировавших компонентов. Далее проводится ступенчатая замена (с шагом 20 масс%) растворителя на изопропиловый спирт по схеме.

Между каждым шагом замены частицы выдерживаются 4 часа. Завершающим этапом получения является сверхкритическая сушка в среде CO_2 [11-13].

Технологическая схема и внешний вид лабораторной установки для проведения сверхкритической сушки представлены на рис. 2. Технология сверхкритической сушки позволяет удалить растворитель из структуры материала без разрушения микро- и мезопор. Сушка осуществлялась в аппарате высокого давления собственной конструкции объемом 2 л.



(a)



(б)

Рис. 2. Внешний вид аппарата высокого давления (а) и принципиальная схема установки (б) для проведения процесса сверхкритической сушки: 1 – баллон с жидким диоксидом углерода (6 МПа); 2 – конденсатор; 3 – насос; 4 – теплообменник; 5 – сосуд высокого давления объемом 2 л; 6 – нагревательный элемент; 7 – сепаратор

Fig. 2. External view of the high-pressure apparatus (a) and the basic diagram of the installation (b) for carrying out the process of supercritical drying: 1 - cylinder with liquid carbon dioxide (6 MPa); 2 - condenser; 3 - pump; 4 - heat exchanger; 5 - high-pressure vessel with a volume of 2 l; 6 - heating element; 7 - separator

Сверхкритическая сушка проводилась при температуре 40°C, давлении 12 МПа, расходе диоксида углерода 1000 г/ч, время процесса составило 5-6 ч. После завершения процесса сушки осуществляется сброс давления со скоростью 0.4 МПа/мин. На рис. 3 представлена диаграмма состояния диоксида углерода, кривая конденсации

соответствует устойчивому равновесию жидкой и газообразной фазы. Точки, лежащие на этой кривой, соответствуют параметрам перехода из жидкого состояния в газообразное и, наоборот, в критической точке исчезает различие между жидкостью и газом и вещество переходит в сверхкритическое состояние.

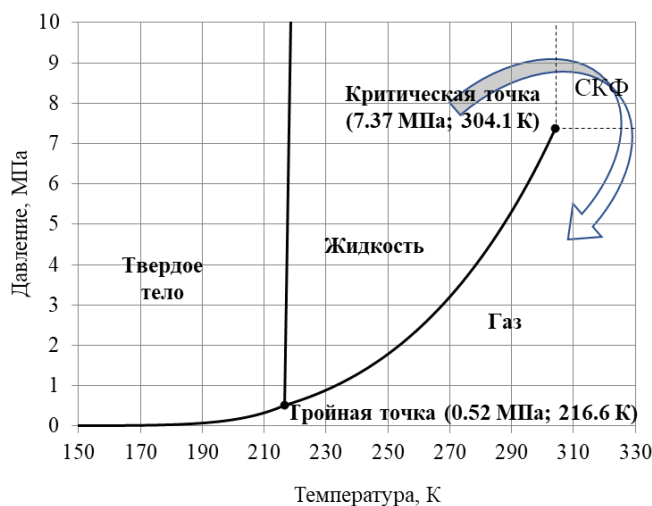


Рис. 3. Диаграмма состояния диоксида углерода
Fig. 3. Phasediagram ofcarbondioxide

Ход процесса сверхкритической сушки показан на рис. 3 стрелкой. В начальный момент времени в аппарат высокого давления поступает CO₂ в жидком состоянии (298 K, 6 МПа). Жидкий CO₂ смешивается сизопропиловым спиртом, находящимся в порах гелей, что приводит к увеличению объема жидкой фазы в аппарате.

Далее давление и температура в аппарате повышаются выше критических для диоксида углерода и устанавливается на уровне 12 МПа и 40°C. Устанавливается заданный расход сушильного агента (CO₂), происходит вытеснение растворителя из свободного объема аппарата и диффузионное замещение изопропилового спирта в порах геля на сверхкритический диоксид углерода. Конвективный транспорт определяет скорость вытеснения растворителя из свободного объема аппарата. Диффузия определяет скорость замещения растворителя в порах геля.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на оборудовании JEOL 1610LV (JEOL, Япония) были проведены исследования поверхности материалов.

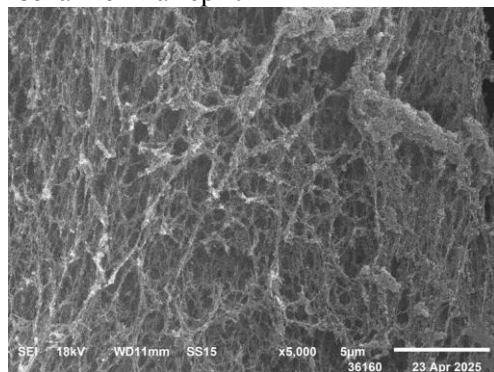
Пористая структура образцов исследовалась методом низкотемпературной адсорбции азота (77 K) на анализаторе удельной поверхности

NOVA 2200E (QuantachromeInstrumentsCorp., США). Перед анализом проводилась пробоподготовка образцов при давлении 0,5 мм.рт.ст. и температуре 353 K в течение 12 ч для удаления всей адсорбированной влаги с поверхности образцов. Удельная площадь поверхности определялась по методу Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ), распределение пор по размерам и объем мезопор по методу Баррета-Джойнера-Халенды (БДХ).

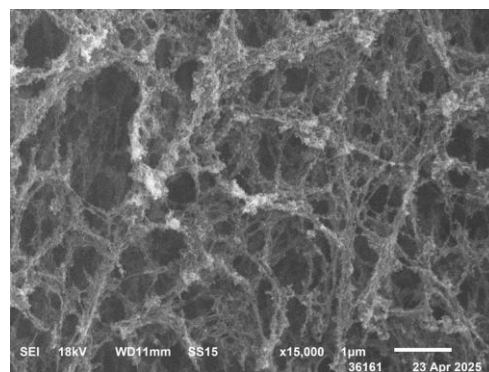
Исследование антибактериальной активности полученных гибридных аэрогелей альгинат-хитозан проводилось по отношению к следующим штаммам: *Escherichiacoli* K12 (ATCC 25922), *Staphylococcusepidermidis* (ATCC 49461). *E. coli* культивировались на PCA (Plate Count Agar, BTL Poland), *S. epidermidis* на agarBHI (Brain Heart Infusion Agar, BTL, Łódź, Poland). Испытания антибактериальных свойств проводились в соответствии со стандартами Европейской Фармакопеи 5.0. Использовался диско-диффузионный метод.

Бактерии предварительно культивировали в соответствующих жидких средах: *E. Coli* в EnrichedBroth (BIOMAXIMA, Польша) при 37°C и *S. Epidermidis* в BrainHeartInfusionBroth (BTL, Польша) при 37°C. Затем культуры разводили до оптической плотности 0.50 по стандарту МакФарланда, что соответствует $\approx 1,5 \times 10^8$ КОЕ·мл⁻¹. По 300 мкл суспензии равномерно наносили на соот-

ветствующие агаровые среды. Образцы гибридных аэрогелей альгинат-хитозан помещали чашки Петри с агаровой средой. Диск с Мирамистином использовался в качестве контроля (образец К). Инкубацию проводили при 37°C в течение 24 ч. Зону ингибирования вокруг дисков фиксировали с использованием камеры.



(a)

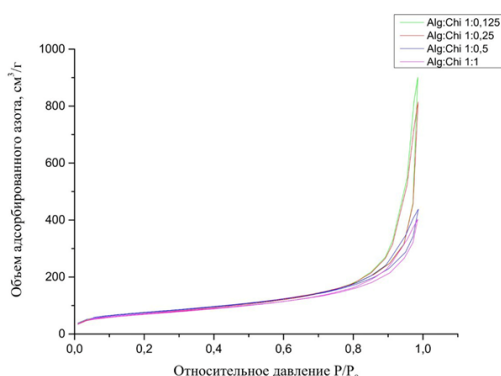


(б)

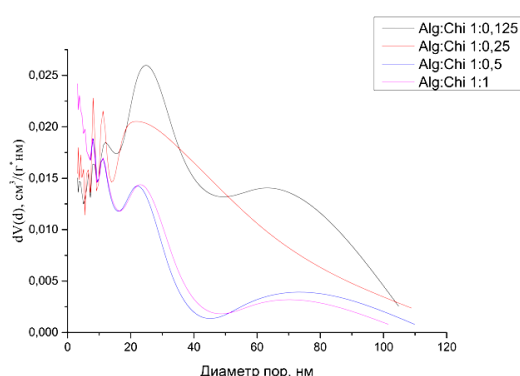
Рис. 4. Изображения СЭМ образца гибридного аэрогеля с соотношением альгинат:хитозан 1:1
Fig. 4. SEM images of a hybrid aerogel sample with an alginate:chitosan ratio of 1:1

Гибридный аэрогель демонстрирует высокопористую трехмерную сеть нановолокон альгинат-хитозанового полиэлектролитного комплекса. Размер волокон лежит в диапазоне от 30 до 70 нм. Результаты СЭМ демонстрируют наличие пор в образцах от 0,1 до 10 мкм. При этом формируются однородная структура гибридных аэрогелей альгинат-хитозан. Для исследования внутренней структуры образцов гибридных аэрогелей альгинат-хитозан были проведены аналитические исследования с использованием метода азотной порометрии при температуре кипения жидкого азота. На рис. 5 представлены изотермы адсорбции/десорбции (а) и распределение пор по размерам (б) для гибридных аэрогелей с варьированием концентрации хитозана.

Изотермы для всех образцов гибридных аэрогелей альгинат-хитозан – типичные изотермы IV(a) по классификации IUPAC с петлей гистерезиса H3 [14, 15]. Это указывает на мезопористую структуру образцов (преимущественно с щелевидными порами от 30 до 60 нм) и практически полное отсутствие микропор (до 2 нм). При увеличении концентрации хитозана общий объем пор и удельная поверхность постепенно снижаются, что связано с увеличением плотности полиэлектролитного комплекса альгинат-хитозан. В табл. 1 представлены характеристики полученных образцов гибридных аэрогелей альгинат-хитозан ($S_{уд}$ – удельная площадь поверхности, $V_{пор}$ – объем мезопор, $D_{пор}$ – средний диаметр пор).



(a)



(б)

Рис. 5. Изотермы адсорбции/десорбции (а) и распределения пор по размерам (б) для образцов гибридных аэрогелей альгинат-хитозан

Fig. 5. Adsorption/desorption isotherms (a) and pore size distribution (b) for alginate-chitosan hybrid aerogel samples

Характеристики полученных образцов
Table 1. Characteristics of the obtained samples

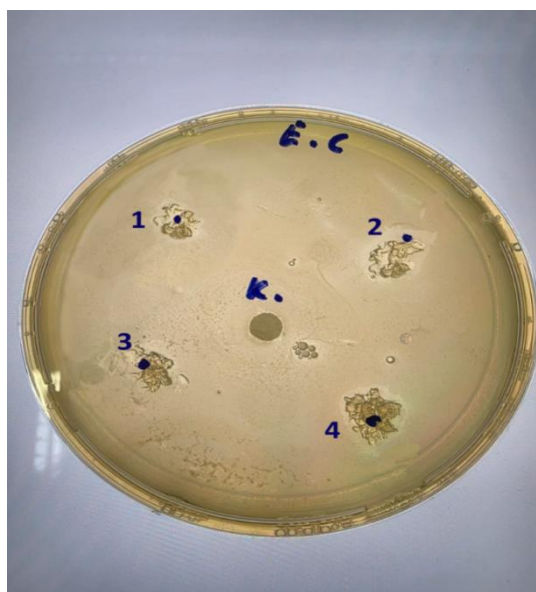
№	Соотношение Alg:Chi	$S_{уд}$, м ² /г	$V_{пор}$, см ³ /г	$D_{пор}$, нм
1	1:0.125	273	1,37	22
2	1:0.25	271	1,23	8
3	1:0.5	274	0,63	3
4	1:1	253	0,57	3

Увеличение концентрации хитозана приводит к уменьшению объема мезопор и среднего диаметра пор, что предположительно связано с формированием более жестких и плотных структур. Сшибка частиц происходит при контакте растворов альгината и хитозана.

Увеличение градиента концентрации ускоряет процесс сшивки и приводит к локальному уплотнению структуры.

На рис. 6 представлены результаты исследования антибактериальной активности образцов гибридных аэрогелей альгинат-хитозан. В жидких средах образцы набухали.

Образцы гибридных аэрогелей альгинат-хитозан продемонстрировали эффективное подавление роста микроорганизмов *Escherichiacoli* и *Staphylococcusepidermidis*. Для *Escherichiacoli* площадь зон подавления увеличилась с 9.5 до 16 мм по мере увеличения концентрации хитозана в образцах. В случае *Staphylococcusepidermidis* антибактериальные свойства продемонстрировали образцы с соотношением Alg:Chi 1:0.25; 1:0.5; 1:1. Образец с соотношением Alg:Chi 1:0.125 не подавил рост *Staphylococcusepidermidis*. Контрольный образец (К) не продемонстрировал антибактериальной активности.



(a)



(б)

Рис. 6. Исследование антибактериальной активности гибридных аэрогелей альгинат-хитозан по отношению к *Escherichiacoli* (a) *Staphylococcusepidermidis* (б); 1,2,3,4 – соотношения Alg:Chi 1:0.125; 1:0.25; 1:0.5; 1:1 соответственно

Fig. 6. Antibacterial activity of hybrid alginate-chitosan aerogels against *Escherichia coli* (a) *Staphylococcus epidermidis* (b); 1,2,3,4 – Alg:Chi ratios 1:0.125; 1:0.25; 1:0.5; 1:1 respectively

Основной вклад в антибактериальную активность в структуре полиэлектролитного комплекса альгинат-хитозан вносит хитозан. Хитозан содержит аминогруппы ($-NH_2$), которые протонируются в кислой среде, образуя положительно заряженные $-NH_3^+$, которые в свою очередь взаимодействуют с отрицательно заряженными компонентами бактериальных мембран. Взаимодействие приводит к нарушению целостности мембраны,

утечке внутриклеточных компонентов (ионов, белков, АТФ), лизису клеток. Хитозан и альгинат способны связывать ионы металлов (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+}), необходимые для бактериальных ферментов, нарушая их активность.

Кроме того, мезопористая структура аэрогеля обеспечивает большую площадь контакта и препятствует адгезии бактерий к поверхности и формированию биопленок.

ВЫВОДЫ

Предложена оригинальная методика получения гибридных аэрогелей на основе полиэлектролитного комплекса альгинат-хитозан. Методика обеспечивает получение однородных высокопористых материалов без использования дополнительных токсичных сшивающих агентов. Исследование с использованием СЭМ показало, что структура аэрогелей образована волокнами диаметром от 30 до 70 нм, а поры от 0,1 до 10 мкм. Анализ гибридных аэрогелей альгинат-хитозан с использованием азотной порометрии показал, что образцы представляют мезопористые материалы с удельной поверхностью от 253 до 273 м²/г, объемом мезопор от 0.57 до 1.37 см³/г. Увеличение доли хитозана снижает объем мезопор.

Гибридные аэрогели альгинат-хитозан продемонстрировали эффективное подавление роста микроорганизмов *Escherichiacoli* и *Staphylococcusepidermidis*.

Антибактериальное действие является следствием электростатического нарушения мембран, метаболического подавления и структурного ингибирования биопленок. Антибактериальная эффективность гибридных аэрогелей альгинат-хитозан может быть оптимизирована путем регулирования соотношения биополимеров, добавления функциональных наночастиц и активных фармацевтических субстанций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда №23-73-01216

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out with financial support of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-73-01216

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшкова Н.А. и др. Влияние структуры альгинат-хитозановых материалов на кинетику высвобождения урсниновой кислоты. *Прикладная биохимия и микробиология*. 2022. Т. 58. №. 2. С. 123-131.
2. Lovskaya D. et al. Chitosan-based aerogel particles as highly effective local hemostatic agents. production process and in vivo evaluations. *Polymers*. 2020. V. 12. 9. P. 2055.
3. Горшкова Н.А., Паламарчук И.А., Бровко О.С. и др. Получение магнетитсодержащих композитных аэрогелей на основе комплекса альгинат-хитозан. *Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика*. 2024. Т. 19. № 3. С. 13-29.
4. Subrahmanyam R. et al. On the road to biopolymer aerogels- Dealing with the solvent. *Gels*. 2015. V. 1. 2. P. 291-313.
5. García-González C., Camino-Rey M., Alnaief M., Zetzl C., Smirnova I. Supercritical drying of aerogels using CO₂: Effect of extraction time on the end material textural properties. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2012, 66, 297-306.
6. Guo N, Xia Y, Zeng W, Chen J et al. Alginate-based aerogels as wound dressings for efficient bacterial capture and enhanced antibacterial photodynamic therapy. *Drug Deliv*. 2022. Dec; 29(1):1086-1099.
7. VanEpps J.S., Younger J.G. Implantable Device-Related Infection. *Shock*. 2016. Dec; 46(6):597-608.
8. Lovskaya D. et al. Preparation of protein aerogel particles for the development of innovative drug delivery systems. *Gels*. 2022. Vol. 8. 12. P. 765.
9. García-González C.A. et al. Aerogels in drug delivery: From design to application. *Journal of Controlled Release*. 2021. T. 332. P. 40-63.
10. Цыганков П.Ю., Пашкин Е.А., Абрамов А.А. Структура и свойства гибридных аэрогелей на основе полиэлектролитного комплекса «альгинат натрия – хитозан». *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2024. Т. 30. №3. С. 484-496.

REFERENCES

1. Gorshkova N.A. et al. Effect of the structure of alginate-chitosan materials on the kinetics of usnic acid release. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2022. V. 58. N 2. P. 123-131.
2. Lovskaya D. et al. Chitosan-based aerogel particles as highly effective local hemostatic agents. production process and in vivo evaluations. *Polymers*. 2020. V. 12. 9. P. 2055.
3. Gorshkova N.A., Palamarchuk I.A., O.S. Brovko O.S. et al. Production of magnetite-containing composite aerogels based on an alginate-chitosan complex. *Supercritical Fluids: Theory and Practice*. 2024. V. 19. N 3. P. 13-29.
4. Subrahmanyam R. et al. On the road to biopolymer aerogels Dealing with the solvent. *Gels*. 2015. V. 1. 2. P. 291-313.
5. García-González C., Camino-Rey M., Alnaief M., Zetzl C., Smirnova I. Supercritical drying of aerogels using CO₂: Effect of extraction time on the end material textural properties. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2012, 66, 297-306.
6. Guo N, Xia Y, Zeng W, Chen J et al. Alginate-based aerogels as wound dressings for efficient bacterial capture and enhanced antibacterial photodynamic therapy. *Drug Deliv*. 2022. Dec; 29(1):1086-1099.
7. VanEpps J.S., Younger J.G. Implantable Device-Related Infection. *Shock*. 2016. Dec; 46(6):597-608.
8. Lovskaya D. et al. Preparation of protein aerogel particles for the development of innovative drug delivery systems. *Gels*. 2022. V. 8. 12. P. 765.
9. García-González C.A. et al. Aerogels in drug delivery: From design to application. *Journal of Controlled Release*. 2021. T. 332. P. 40-63.
10. Tsygankov P.Y., Pashkin E.A., Abramov A.A. The structure and properties of hybrid aerogels based on the polyelectrolyte complex “alginate – chitosan”. *Transactions of the Tambov State Technical University*. 2024. V. 30. N. 3. P. 484-496.

11. **Шиндряев А.В., Лебедев А.Е., Меньшутина Н.В.** Моделирование технологической схемы при получении теплоизоляционных материалов на основе аэрогелей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 12. С. 87-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6646.
12. **Зун Н.В., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В.** Гибридные аэрогели на основе лигнина, полученного из растительного сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 4. С. 75-83. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6767.
13. **Голубев Э.В., Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Меньшутина Н.В.** Разработка совмещенных процессов сушки и стерилизации высокопористых материалов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. Об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 93-100. DOI: 10.6060/rcj.2024682.13.
14. **Tommes M. et al.** Physical adsorption of gases with special attention to the assessment of surface area and pore size distribution (IUPAC technical report). *Pure Appl. Chemistry*. 2015. Volume 87, N 9-10. P. 1051-1069.
15. **Мурашова Н.М., Нгуен Х.Т., Шаропова Е.К.** Получение микроэмульсий и жидких кристаллов в системах с лецитином и растительными маслами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 96-103. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6768.
11. **Shindryaev A.V., Lebedev A.E., Menshutina N.V.** Simulation of a technological scheme in obtaining heat-insulating materials on the basis of airogels. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 12. P. 87-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6646.
12. **Duy N.V., Tsygankov P.Yu., Menshutina N.V.** Hybrid aerogels based on lignin, derived from vegetable raw materials. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 4. P. 75-83. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6767.
13. **Golubev E.V., Abramov A.A., Tsygankov P.Yu., Menshutina N.V.** Development of combined processes of supercritical drying and sterilization of highly porous materials. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 93-100. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.13.
14. **Tommes M. et al.** Physical adsorption of gases with special attention to the assessment of surface area and pore size distribution (IUPAC technical report). *Pure Appl. Chemistry*. 2015. Volume 87, N 9-10. P. 1051-1069.
15. **Murashova N.M., Nguyen H.T., Sharapova E.K.** Obtaining microemulsions and liquid crystals in systems with lecithin and vegetable oils. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 96-103. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6768.

Поступила в редакцию(Received) 05.06.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 12.07.2025