

ФОРМИРОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АЭРОГЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АЛЬГИНАТА НАТРИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССА ВСПЕНИВАНИЯ В СРЕДЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Абрамов А.А., Цыганков П.Ю., Голубев Э.В., Меньшутина Н.В.

Абрамов Андрей Александрович (ORCID 0000-0002-7079-0672), Цыганков Павел Юрьевич (ORCID 0000-0003-2630-3838), Голубев Эльдар Валерьевич (ORCID 0009-0008-1243-6756), Меньшутина Наталья Васильевна (ORCID 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: abramovandrey516@gmail.com, pavel.yur.tsygankov@gmail.com, el.v.golubev@gmail.com, chemcom@muctr.ru

Развитие медицины и фармацевтической промышленности обуславливает необходимость в разработке новых материалов, обладающих заданными свойствами. Свойства материалов определяются химическим составом и структурой. Например, формирование иерархической структуры материалов на основе биополимеров позволяет получить высокоэффективные матрицы для роста клеток. Заданная структура обеспечивает высокую пролиферативную активность клеток за счет улучшения подвода питательных веществ к клеткам и отвода продуктов метаболизма. Одним из подходов к формированию иерархической структуры является вспенивание в среде диоксида углерода. В данной работе представлено исследование процесса формирования иерархической пористой структуры в аэрогелях на основе альгината натрия методом вспенивания в среде диоксида углерода. Проведено варьирование концентрации сшивающего агента (1.5 и 2% масс.), давления (50 и 100 бар) и времени проведения процесса (1 и 3 ч). Оценка формирования иерархической пористости проводилась с использованием методов азотной порометрии и сканирующей электронной микроскопии. В ходе исследования определено влияние параметров процесса получения на конечные характеристики аэрогелей. На основании полученных результатов установлено, что данный метод позволяет получать аэрогели на основе альгината натрия с различной плотностью 87-413 кг/м³, удельной площадью поверхности 112-269 м²/г и заданной как макропористой, так и мезопористой структурой.

Ключевые слова: иерархическая пористость, аэрогель, вспенивание, альгинат натрия, макропористая структура

FORMATION OF A HIERARCHICAL STRUCTURE IN AEROGELS BASED ON SODIUM ALGINATE USING THE FOAMING PROCESS IN A CARBON DIOXIDE ENVIRONMENT

Abramov A.A., Tsygankov P.Yu., Golubev E.V., Menshutina N.V.

Abramov Andrey Alexandrovich (ORCID 0000-0002-7079-0672), Tsygankov Pavel Yurievich (ORCID 0000-0003-2630-3838), Golubev Eldar Valerievich (ORCID 0009-0008-1243-6756), Menshutina Natalya Vasilievna (ORCID 0000-0001-7806-1426)
Russian University of Chemical Technology DI. Mendeleev,
Moscow, Russia. 125047, Moscow region, Moscow, Miusskaya square, 9.
E-mail: abramovandrey516@gmail.com, pavel.yur.tsygankov@gmail.com, el.v.golubev@gmail.com, chemcom@muctr.ru

The development of medicine and the pharmaceutical industry necessitates the development of new materials with desired properties. The properties of materials are determined by their chemical composition and structure. For example, the formation of a hierarchical structure of materials based on biopolymers makes it possible to obtain highly efficient matrices for cell growth. The specified structure ensures high proliferative activity of cells by improving the supply of nutrients to

cells and the removal of metabolic products. One of the approaches to the formation of a hierarchical structure is foaming in a carbon dioxide environment. This paper presents a study of the process of formation of a hierarchical porous structure in aerogels based on sodium alginate by foaming in a carbon dioxide medium. The concentration of the crosslinking agent (1.5 and 2% by weight), pressure (50 and 100 bar) and process time (1 and 3 hours) were varied. The assessment of the formation of hierarchical porosity was carried out using the methods of nitrogen porometry and scanning electron microscopy. In the course of the study, the influence of the parameters of the production process on the final characteristics of aerogels was determined. Based on the results obtained, it was found that this method makes it possible to obtain aerogels based on sodium alginate with different densities of 87-413 kg/m³, a specific surface area of 112-269 m²/g and a given macroporous and mesoporous structure.

Keywords: hierarchical porosity, aerogel, foaming, sodium alginate, macroporous structure

ВВЕДЕНИЕ

Под иерархической пористостью материалов понимается многоуровневое строение структуры, которая представляет собой систему открытых связанных микро-, мезо- и макропор [1-4]. Такие структуры обеспечивают эффективный контролируемый массоперенос и дают возможность регулировать протекающие в них процессы [5-8]. Формирование иерархической пористости является сложной научно-технической задачей, различные методы решения которой ранее уже были описаны в научной литературе [9, 10].

Примером материалов с мезопористой структурой являются аэрогели. Аэрогели представляют собой класс высокопористых наноструктурированных материалов с размером пор 2-100 нм [11, 12]. Задание иерархической пористости в таких материалах позволит расширить спектр возможных применений.

Для получения иерархической пористой структуры на макроуровне используются три основных подхода: с использованием мягких [10, 13] или твердых темплатов [14] и безтемплантные методы [15] (рис. 1).



Рис. 1. Методы формирования иерархической пористой структуры
Fig. 1. Methods of forming a hierarchical porous structure

В качестве мягких темплатов могут выступать поверхностно-активные вещества (ПАВ) или жидкие порообразующие компоненты, формирующие эмульсии с раствором полимера [16]. Среди твердых темплатов наиболее распространены коллоидные кристаллы и белки, например, зеин [17]. В процессе получения материалов с иерархической пористой структурой темплатные удаляются. Безтемплантные методы: методы самосборки и вспенивания в среде различных газов.

Перспективным безтемплантным методом является формирование иерархической пористости в среде диоксида углерода (CO₂).

В работе [18] описывается способ получения аэрогелей на основе альгината натрия, в рамках которого этап гелеобразования осуществляется с использованием диоксида углерода.

Такой подход является эффективным методом формирования иерархической пористой структуры в аэрогелях.

Гелеобразование альгината натрия в среде диоксида углерода сопровождается его вспениванием за счет высвобождения газообразного CO_2 при резком сбросе давления. Вспенивание полимера позволяет формировать макропористую структуру. Далее проводится процесс сверхкритической сушки, обеспечивающий сохранение микро- и мезопористой структуры, сформированной на стадии гелеобразования.

В данной работе исследованы процессы формирования иерархической пористости с ис-

пользованием CO_2 в аэрогелях на основе альгината натрия, определено влияние таких параметров как давление, концентрация сшивающего агента и продолжительность процесса на характеристики и пористую структуру материалов.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ

На рис. 2 представлена методика получения аэрогелей на основе альгината натрия с иерархической пористой структурой в среде диоксида углерода.

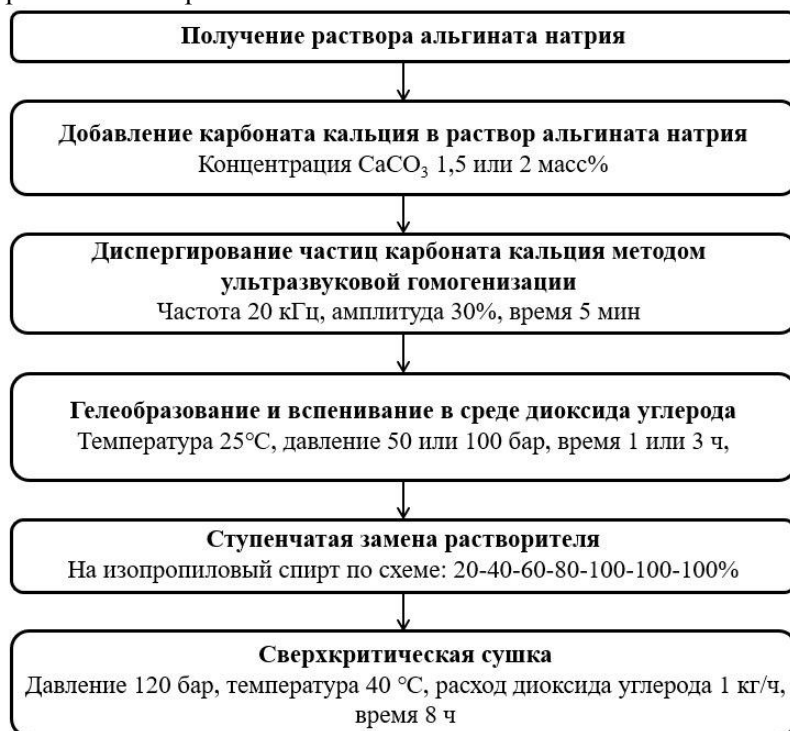


Рис. 2. Методика получения аэрогелей на основе альгината натрия с иерархической пористой структурой

Fig. 2. The method of obtaining aerogels based on sodium alginate with a hierarchical porous structure

На первом этапе экспериментальных исследований были получены водные растворы альгината натрия с концентрацией 2 %_{масс}. В растворы были добавлены частицы карбоната кальция (CaCO_3). Полученные суспензии с концентрацией CaCO_3 1,5 или 2 %_{масс} подвергались ультразвуковой гомогенизации (Bandelin SONOPULS HD 4100) при частоте 20 кГц, амплитуде 30% в течение 5 минут для достижения равномерного распределения частиц карбоната кальция.

После этапа гомогенизации суспензии разливались по чашкам Петри (35x5 мм) и помещались в аппарат высокого давления объемом 70 мл (рис. 3). Аппарат герметизировался, и диоксид углерода (температурой 25°C) подавался в систему до достижения заданного давления (50 или 100

бар). Диоксид углерода растворялся в дисперсии и формировал кислую среду, тем самым инициируя процесс растворения частиц карбоната кальция. Катионы кальция обеспечивали сшивку альгината натрия. В рамках проведения экспериментальных исследований варьировались: концентрация сшивающего агента (1,5 или 2 %_{масс}), давление (50 или 100 бар) и время процесса (1 или 3 ч). По окончании этапа осуществлялся резкий сброс давления в аппарате со скоростью 50 бар/с. Образцы гелей извлекались из аппарата высокого давления.

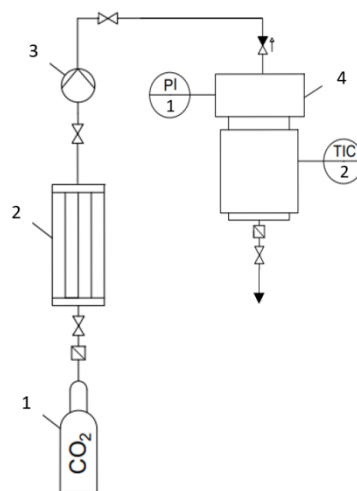
На следующем этапе проводилась ступенчатая замена растворителя в образцах гелей на изопропиловый спирт. Замена растворителя необходима для проведения процесса сверхкритической сушки, в ходе которой растворитель должен

неограниченно смешиваться со сверхкритическим флюидом. Ступенчатая замена минимизирует усадку гелей, которая является следствием разницы значений поверхностного натяжения двух растворителей.

Сушка осуществлялась в аппарате высокого давления собственной конструкции объемом 250 мл (рис. 4). Технология сверхкритической сушки позволяет удалить растворитель из структуры материала без разрушения микро- и мезопор.



(a)



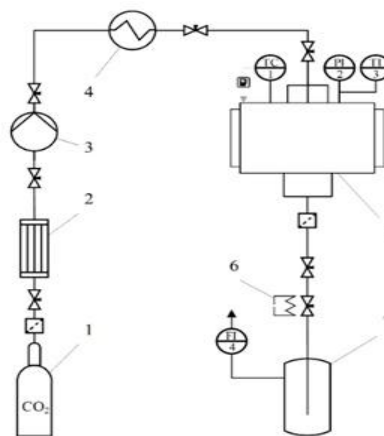
(б)

Рис. 3. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) установки для проведения процесса вспенивания материалов: 1 – баллон с диоксидом углерода, 2 – конденсатор, 3 – насос, 4 – аппарат высокого давления объемом 70 мл, PI1 – манометр, TIC2 – датчик и регулятор температуры

Fig. 3. Appearance (a) and schematic diagram (b) of the installation for carrying out the foaming process of materials: 1 – carbon dioxide cylinder, 2 – condenser, 3 – pump, 4 – 70 ml high-pressure apparatus, PI1 – pressure gauge, TIC2 – temperature sensor and regulator



(a)



(б)

Рис. 4. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) установки для проведения процесса сверхкритической сушки: 1 – баллон диоксида углерода, 2 – конденсатор, 3 – насос, 4 – теплообменник, 5 – аппарат высокого давления объемом 250 мл, 6 – нагревательный элемент, 7 – сепаратор, PI1 – манометр, TIC2 – датчик и регулятор температуры

Fig. 4. Appearance (a) and schematic diagram (b) of the installation for the supercritical drying process: 1 – carbon dioxide cylinder, 2 – condenser, 3 – pump, 4 – heat exchanger, 5 – 250 ml high-pressure apparatus, 6 – heating element, 7 – separator, PI1 – pressure gauge, TIC2 – temperature sensor and controller

Параметры и время процесса были выбраны на основании литературных данных [19] и со-

ставили 120 бар, 40⁰С при расходе диоксида углерода 1 кг/ч и времени процесса 8 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на наличие работ по данной тематике [18, 20], авторы данного исследования предполагают, что лимитирующей стадией процесса гелеобразования является скорость диффузии диоксида углерода в жидкой фазе, а именно, в смеси «полимер-вода». Таким образом, процесс начинается с диффузии диоксида углерода в жидкость, а именно, водный раствор альгината натрия с заданной концентрацией. В процессе диффузии происходит взаимодействие диоксида углерода с водой, которое приводит к образованию неустойчивой угольной кислоты в соответствии с химической реакцией:



Образование кислоты приводит к снижению pH системы, что, в свою очередь, сопровождается высвобождением катионов за счет диссоциации карбоната кальция, находящегося в суспензии альгината: $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{\text{H}^+} \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ (2)

C_{CaCO_3} ,
%масс.

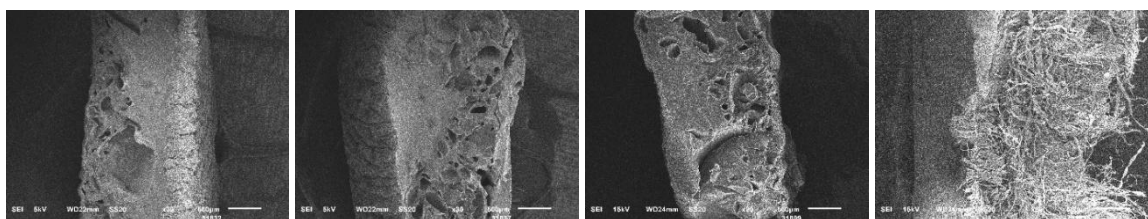
50 бар/1 ч

50 бар/3 ч

100 бар/1 ч

100 бар/3 ч

1.5



2

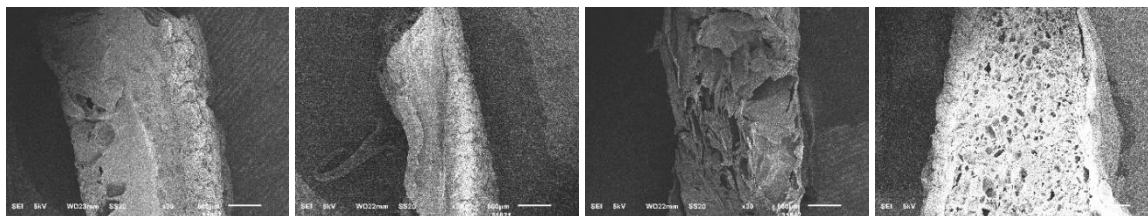


Рис. 5. Изображения СЭМ образцов с разрешением 500 мкм
Fig. 5. SEM images of samples with a resolution of 500 microns

На основании полученных результатов установлено, что время процесса является лимитирующей стадией для формирования равномерной макропористой структуры. Это обусловлено ограниченной скоростью диффузии диоксида углерода в объеме материала. Образование угольной кислоты и, как следствие, изменение кислотности среды происходит не полностью, что обуславливает формирование макропор преимущественно в месте контакта материала с диоксидом углерода. Кроме того, стоит отметить, что увеличение давления диоксида углерода приводит к увеличению коэффициента диффузии, растворимости диокси-

да углерода в объеме полимерного раствора. Это обуславливает равномерное распределение макропористой структуры в случае проведения процесса при давлении 100 бар и продолжительности 3 часа.

С целью исследования мезопор были проведены аналитические исследования с использованием метода азотной порометрии при температуре кипения жидкого азота.

Ниже приведены изотермы адсорбции/десорбции (рис. 6,а) и распределение пор по размерам (рис. 6,б) для аэрогелей, полученных при различных параметрах процесса.

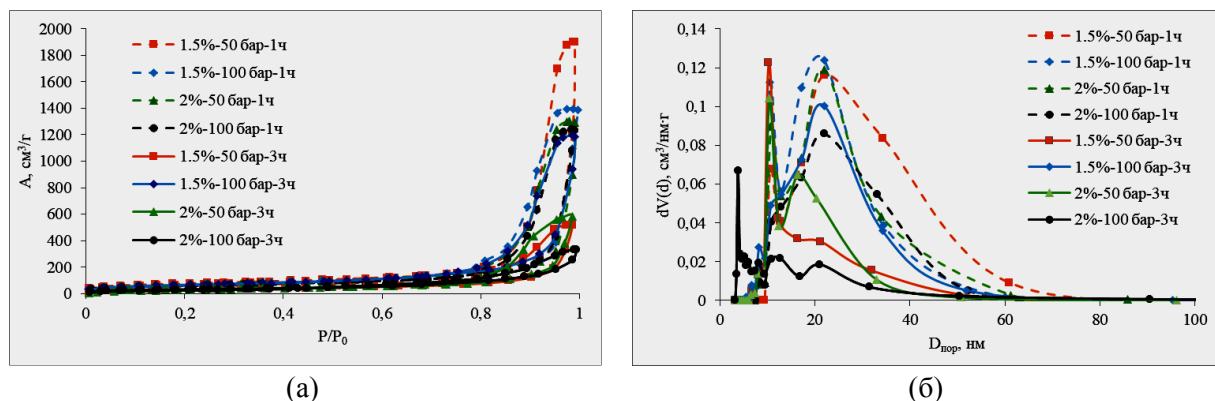


Рис. 6. Изотермы адсорбции/десорбции (а) и распределения пор по размерам (б)
Fig. 6. Adsorption/desorption isotherms (a) and pore size distribution (b)

Полученные изотермы относятся к IV типу изотерм адсорбции/десорбции по классификации IUPAC [21]. Данный вид изотерм характерен для обратимой адсорбции на мезопористых материалах по механизму полимолекулярной адсорбции. На изотермах наблюдаются петли гистерезиса, характеризующие протекание процесса капиллярной конденсации. Петли гистерезиса относятся к типу H1, что характерно для пористой структуры, состоящей преимущественно из пор цилиндрической формы.

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что независимо от концентрации карбоната кальция в структуре при проведении процесса гелеобразования в течении 1 часа наиболее выражена мезопористая структура. На это указывает значительное количество адсорбированного азота и широкий диапазон распределения мезопор по размерам.

Диоксид углерода диффундирует в поверхность материала и, как результат, формирование макропористой структуры наблюдается в месте контакта материала с диоксидом углерода. Увеличение времени процесса способствует снижению количества адсорбированного азота, вследствие частичного разрушения мезопористой структуры в процессе образования макропор. Это обуславливается более глубоким проникновением диоксида углерода по всему объему материала, что приводит к формированию макропористой структуры при высвобождении газа в ходе сброса давления. Представленные выводы подтверждаются результатами СЭМ.

Ниже представлена сводная таблица характеристик полученных образцов (таблица), в которой отражены значения плотности ρ , среднего объема пор $V_{\text{пор}}$, удельной площади поверхности $S_{\text{уд}}$, среднего диаметра пор $D_{\text{пор}}$.

Таблица

Характеристики полученных образцов
Table. Characteristics of the obtained samples

C_a , %	P , бар	t , ч	ρ , кг/м ³	$V_{\text{пор}}$, см ³ /г	$S_{\text{уд}}$, м ² /г	$D_{\text{мезопор}}$, нм
1.5	50	1	413	3.1	269	22
		3	357	0.8	118	10
	100	1	182	2.3	251	22
		3	118	1.9	239	22
2	50	1	222	2.1	239	22
		3	87	1.0	128	10
	100	1	177	2.0	206	22
		3	106	0.6	112	4

По полученным результатам можно сделать вывод, что параметры проведения процесса оказывают влияние на плотности аэрогелей. С увеличением концентрации сшивающего агента, давления и времени процесса наблюдается снижение плотности полученных образцов. Увеличение времени процесса гелеобразования способствует более глубокому проникновению диоксида угле-

рода и, как следствие, образованию большего количества макропор. Увеличение давления увеличивает скорости диффузии диоксида углерода, что приводит к более равномерному распределению CO_2 в объеме суспензии еще до момента гелеобразования. Кроме того, концентрация карбоната кальция оказывает влияние на плотность формируемого твердого каркаса.

Увеличение концентрации сшивающего агента сопровождается увеличением концентрации катионов кальция, способных взаимодействовать с полимерными цепями альгината. Вспенивание более плотной структуры позволяет предотвратить разрушение твердого каркаса в макропористой структуре материала.

ВЫВОДЫ

В рамках данной работы было проведено исследование процесса формирования иерархической пористой структуры в образцах на основе альгината натрия полученных методом вспенивания в среде диоксида углерода. В качестве варьируемых параметров были выбраны концентрация сшивающего агента (карбонат кальция: 1,5 или 2%_{масс.}), давление (50 или 100 бар) и продолжительности процесса гелеобразования в среде CO₂ (1 или 3 ч). С помощью предложенного метода были получены аэрогели на основе альгината натрия с плотностью 87-413 кг/м³ и удельной площадью поверхности 112-269 м²/г.

Оценка формирования иерархической пористости на мезо - и макроуровне проводилась с помощью методов азотной порометрии и сканирующей электронной микроскопии. По полученным результатам сделан вывод о комплексном влиянии исследуемых параметров на структуру конечного материала.

Концентрация сшивающего агента оказывает влияние на плотность твердого каркаса формируемой пористой системы. Увеличение давления способствует повышению скорости диффузии диоксида углерода в смесь «полимер-вода» и, как следствие, более равномерному распределению макропор.

Увеличение времени продолжительности процесса способствует эффективному распределению диоксида углерода в объеме материала, что, в свою очередь, оказывает влияние на равномерность распределения макропор.

По результатам исследования сделан вывод об эффективности использования метода гелеобразования в среде диоксида углерода с целью задания многоуровневой иерархической пористой структуры в аэрогеле на основе альгината натрия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-13-00368.

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

The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation grant N 23-13-00368.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Гомзяк В.И., Демина В.А., Разуваева Е.В., Седуш Н.Г., Чвалун С.Н. Биоразлагаемые полимерные материалы для медицины: от импланта к органу. *Тонкие химические технологии*. 2017. Т. 12, №5. С. 5-20.
2. Шаницын И.Н., Иванов А.Н., Ульянов В.Ю., Норкин И.А. Современные концепции стимуляции регенерации костной ткани с использованием биологически активных скаффолдов. *Цитология*. 2019. Т. 61, № 1. С. 16-34.
3. Roderick lakes. Materials with a structural hierarchy. *Nature*. 1993. V. 361. P. 511-515.
4. Литвяк В.В., Лукин Н.Д., Кузина Л.Б. [и др.]. Атлас: иерархическая структура белковых веществ: монография; под ред. д.т.н., к.х.н., доц. В.В. Литвяка. Москва: ФЛИНТА, 2023. 297 с.
5. Li Shao, Jinrong Ma, Jesse L. Prelestnik, et al. Hierarchical materials from highly informative macromolecular building blocks: design, dynamic interventions and forecasting. *Chemical Reviews*. 2022. Vol. 122. P. 17397-17478.
6. Yu Xu. Modern inorganic synthetic chemistry. 2nd edition. Changchun: Elsevier, 2017. 785 p.
7. Блиничев В.Н., Лабути А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Мионов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В. Проблемы разработки энерго- и ресурсосбе-

REFERENCES

1. Gomzyak V.I., Demina V.A., Razuvaeva E.V., Sedush N.G., S.N. Chvalun S.N. Biodegradable polymer materials for medicine: from implant to organ. *Fine chemical technologies*. 2017. V. 12, N 5. P. 5-20.
2. Shchanitsyn I.N., Ivanov A.N., Ulyanov V.Yu., Norkin I.A. Modern concepts of stimulation of bone tissue regeneration using biologically active scaffolds. *Cytology*. 2019. V. 61, N 1. P. 16-34.
3. Roderick lakes. Materials with a structural hierarchy. *Nature*. 1993. V. 361. P. 511-515.
4. Litvyak V.V., Lukin N.D., Kuzina L.B. [et al.]. Atlas: hierarchical structure of protein substances: monograph; edited by Dr. of Technical Sciences, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor V.V. Litvyak. Moscow: FLINT, 2023. 297 p.
5. Li Shao, Jinrong Ma, Jesse L. Prelestnik, et al. Hierarchical materials from highly informative macromolecular building blocks: design, dynamic interventions and forecasting. *Chemical Reviews*. 2022. V. 122. P. 17397-17478.
6. Yu Xu. Modern inorganic synthetic chemistry. 2nd edition. Changchun: Elsevier, 2017. 785 p.
7. Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G.N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu.N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of the development of energy-

- регающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j
8. **Чагин О.В., Колобов М.Ю., Миронов Е.В.** Исследование гидродинамики и массообмена в колонном аппарате с насадкой ПВН. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 1(77). С. 109–113. DOI:10.6060/snt.20247701.00015
 9. **Мошников В.А.** Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры; под ред. В.А. Мошникова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 204 с.
 10. **Богданова О.И., Чвалун С.Н.** Природные и синтетические нанокompозиты на основе полисахаридов. *Высокомолекулярные Соединения. Серия А*. 2016. Т. 58, № 5. С. 407-438.
 11. **Lovskaya D., et al.** Obtaining protein aerogel particles for the development of innovative drug delivery systems. *Gels*. 2022. Vol. 8, N 12. P. 765.
 12. **Lovskaya D., et al.** Chitosan-based aerogel particles as highly effective local hemostatic agents. The production process and In Vivo evaluation. *Polymers*. 2020. Vol. 12, N 9. P. 2055.
 13. **Luo H., et al.** Removal and recovery of phosphorus from water using a macroporous granular adsorbent consisting of alginate-Zr⁴⁺ and PNIPAM-interpenetrating grids. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 126. P. 1133-1144.
 14. **Kasaai M.R.** Zein and nanomaterials based on it for food products: a review. *Trends in food science and technology*. 2018. V. 79. P. 184-197.
 15. **Martins M. et al.** Production of aerogels based on macroporous alginate for biomedical applications. *J. Supercrit. Liquids*. 2015. V. 106. P. 152-159.
 16. **Kang Chen, Tengxiao Ren, Shuang Wu, Sisi Xin, Ben Ge, Shanli Hao, Mingyue Ma, Jie Pan, Jingwei Zhang.** Soft conversion of biomass derivatives into 3D interconnected hierarchical porous carbon doped with edge-N for multi-scenario ultra-intensive energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2024. V. 102, part B. N 20. P. 114192.
 17. **Victor Santos-Rosales, Gerardo Alvarez-Rivera, Marcus Hillgartner, Alejandro Cifuentes, Mikhail Itskov, Carlos A. Garcia-Gonzalez, Amea Regge.** Stability studies of starch aerogel formulations for biomedical applications. *Biomacromolecules*. 2020. V. 21, N 12. P. 5336-5344.
 18. **Gurikov P. et al.** A new approach to alginate aerogels: gelation caused by carbon dioxide. *RSC Adv*. 2015. V. 5, N 11. P. 7812-7818.
 19. **Menshutina N., Tsygankov P., Khudeev I., Lebedev A.** Methods of intensification of supercritical drying for obtaining aerogels. *Drying technology*. 2022. V. 40, N 7. P. 1278-1291.
 20. **Preibish I. et al.** Methods of measurement of on-site gelation of biopolymer systems caused by CO₂. *Gels*. 2020. Vol. 6, N 3. P. 28.
 21. **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. V. 87, N 9-10. P. 1051-1069.
 - and resource-saving processes, reactor systems and equipment of intense action, modeling and optimal management. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j
 8. **Chagin O.V., Kolobov M.Yu., Mironov E.V.** Study of hydrodynamics and mass transfer in a column apparatus with a PVN packing. *Modern high technology. Regional application*. 2024. N 1(77). P. 109–113. DOI:10.6060/snt.20247701.00015
 9. **Moshnikov V.A.** Materials science of micro- and nanosystems. Hierarchical structures; edited by V.A. Moshnikov. St. Petersburg: Publishing House of SPbSETU "LETI", 2017. 204 p.
 10. **Bogdanova O.I., Chvalun S.N.** Natural and synthetic nanocomposites based on polysaccharides. *High molecular Weight Compounds. Sergey A*. 2016. V. 58, N 5. P. 407-438.
 11. **Lovskaya D., et al.** Obtaining protein aerogel particles for the development of innovative drug delivery systems. *Gels*. 2022. V. 8, N 12. P. 765.
 12. **Lovskaya D., et al.** Chitosan-based aerogel particles as highly effective local hemostatic agents. The production process and In Vivo evaluation. *Polymers*. 2020. V. 12, N 9. P. 2055.
 13. **Luo H., et al.** Removal and recovery of phosphorus from water using a macroporous granular adsorbent consisting of alginate-Zr⁴⁺ and PNIPAM-interpenetrating grids. *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 126. P. 1133-1144.
 14. **Kasaai M.R.** Zein and nanomaterials based on it for food products: a review. *Trends in food science and technology*. 2018. V. 79. P. 184-197.
 15. **Martins M. et al.** Production of aerogels based on macroporous alginate for biomedical applications. *J. Supercrit. Liquids*. 2015. V. 106. P. 152-159.
 16. **Kang Chen, Tengxiao Ren, Shuang Wu, Sisi Xin, Ben Ge, Shanli Hao, Mingyue Ma, Jie Pan, Jingwei Zhang.** Soft conversion of biomass derivatives into 3D interconnected hierarchical porous carbon doped with edge-N for multi-scenario ultra-intensive energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2024. V. 102, part B. N 20. P. 114192.
 17. **Victor Santos-Rosales, Gerardo Alvarez-Rivera, Marcus Hillgartner, Alejandro Cifuentes, Mikhail Itskov, Carlos A. Garcia-Gonzalez, Amea Regge.** Stability studies of starch aerogel formulations for biomedical applications. *Biomacromolecules*. 2020. V. 21, N 12. P. 5336-5344.
 18. **Gurikov P. et al.** A new approach to alginate aerogels: gelation caused by carbon dioxide. *RSC Adv*. 2015. V. 5, N 11. P. 7812-7818.
 19. **Menshutina N., Tsygankov P., Khudeev I., Lebedev A.** Methods of intensification of supercritical drying for obtaining aerogels. *Drying technology*. 2022. V. 40, N 7. P. 1278-1291.
 20. **Preibish I. et al.** Methods of measurement of on-site gelation of biopolymer systems caused by CO₂. *Gels*. 2020. V. 6, N 3. P. 28.
 21. **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. V. 87, N 9-10. P. 1051-1069.

Поступила в редакцию(Received) 15.12.2024
Принята к опубликованию (Accepted) 26.01.2025