

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ПОЛИАКРИЛАМИДНЫХ ИОНОГЕЛЕЙ

Печникова Н.Л., Коробова В.Д., Кулев В.А., Агеева Т.А.

Печникова Надежда Леонидовна (ORCID 0000-0001-7814-6411), Коробова Виктория Дмитриевна, Кулев Вячеслав Александрович (ORCID 0000-0002-3929-7636), Агеева Татьяна Арсеньевна (ORCID 0000-0001-9445-4262)

Ивановский государственный химико-технологический университет,

г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7.

E-mail: peclin@mail.ru, vikakorobova13@gmail.com, slava.kulev@mail.ru, tageeva@isuct.ru

В работе описан синтез ионогелей, полученных с использованием акриламида и 1-бутил-3-винил-1H-имидазол-3-иум бромида методом радикальной полимеризации в водном растворе. Рассчитаны гель-фракция, содержание воды и степень набухания синтезированных ионогелей. Степень набухания полученных образцов составила 1656-7114%. Показано, что варьирование соотношения акриламида и ионной жидкости позволяет получать ионогели с различными сорбционными характеристиками. Методом сканирующей электронной микроскопии была исследована поверхность синтезированных ионогелей, получены данные о распределении элементов в образцах с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, которая позволила оценить соотношение ионной жидкости и акриламида в ионогелях. С использованием ORCA 6.0 на уровне DFT/M06L/def2-TZVP проведены оптимизация радикальных частиц мономеров и моделирование процесса роста полимерной цепи, результаты которых показали меньшую реакционную способность ионной жидкости по отношению к акриламиду.

Ключевые слова: ионогели, радикальная полимеризация, имидазолиевые ионные жидкости, степень набухания

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF THE POLYACRYLAMIDE IONOGEELS

Pechnikova N.L., Korobova V.D., Kulev V.A., Ageeva T.A.

Pechnikova Nadezhda Leonidovna (ORCID 0000-0001-7814-6411), Korobova Victoria Dmitrievna, Kulev Vyacheslav Aleksandrovich (ORCID 0000-0002-3929-7636), Ageeva Tatyana Arsenyevna (ORCID 0000-0001-9445-4262)

Ivanovo State University of Chemical Technology,

Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.

E-mail: peclin@mail.ru, vikakorobova13@gmail.com, slava.kulev@mail.ru, tageeva@isuct.ru

In this paper, the synthesis of ionogels synthesized using acrylamide and 1-butyl-3-vinyl-1H-imidazole-3-ium bromide by radical polymerization in an aqueous solution is described. The gel fraction, water content, and swelling degree of the synthesized ionogels are calculated. The swelling degree of the samples was 1656-7114%. It is shown that varying a ratio of acrylamide to ionic liquid makes it possible to achieve ionogels with different sorption characteristics. The surface of the synthesized ionogels was studied using scanning electron microscopy, and data on the distribution of elements in the samples were obtained using energy-dispersive X-ray spectroscopy, which estimated the ratio of the ionic liquid and acrylamide in the ionogels. Optimization of the radical particles of the monomers and modeling of the polymer chain growth process, the results of which indicated the lower reactivity of the ionic liquid with respect to acrylamide, were carried out using ORCA 6.0 at the DFT/M06L/def2-TZVP level.

Keywords: ionogels, radical polymerization, imidazolium ionic liquids, swelling ratio

Для цитирования:

Печникова Н.Л., Коробова В.Д., Кулев В.А., Агеева Т.А. Синтез и свойства полиакриламидных ионогелей. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2025. № 4. С. 129-136. DOI: 10.6060/snt.20258404.00017.

For citation:

Pechnikova N.L., Korobova V.D., Kulev V.A., Ageeva T.A. Synthesis and properties of polyacrylamide ionogels. *Modern high technology. Regional application*. 2025. N 4. P. 129-136. DOI: 10.6060/snt.20258404.00017.

ВВЕДЕНИЕ

Гидрогели – особый класс полимерных материалов, имеющих трехмерную структуру и способных набухать в воде, не растворяясь в ней [1]. Гидрогели находят применение в медицине и фармацевтике [2], косметике [3], сельском хозяйстве [4-6] и в качестве пленочных материалов для упаковки пищевых продуктов [7]. Уникальной разновидностью гидрогелей являются ионогели, отличающиеся тем, что в состав таких соединений входят ионные жидкости (ИЖ). В широком смысле ионогели являются материалами, содержащими ионную жидкость независимо от того, иммобилизована она в сформированное твердое вещество или содержится в структуре геля [8]. Ионогели совмещают в себе свойства исходных компонентов: ионных жидкостей и твердых материалов – гелеобразователей (коллоидных, полимерных или супрамолекулярных). Они обладают свойствами, присущими ионным жидкостям: высокая ионная проводимость, эластичность, термостабильность, чувствительность к внешним воздействиям [9-12]. А также, благодаря наличию твердой матрицы в структуре, ионогели отличаются своей способностью к растяжению и сорбции, адгезии, гибкостью, высокой механической прочностью [13, 14]. Материалы, обладающие таким широким набором уникальных свойств, находят применение в различных областях науки и техники в качестве гибких датчиков давления, спортивных трекеров, «электронных носов» [15-17], систем доставки лекарств и покрытий для стентов [18-20], твердых электролитов для солнечных элементов и литий-ионных аккумуляторов [21, 22], в 3D-печати материалов для создания гибких устройств [23]. Таким образом, ионогели являются перспективными материалами для решения задач в различных отраслях медицины и электроники, поэтому в настоящее время актуально изучение полимерных материалов, содержащих в матрице ионные жидкости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы.

Для получения ионогелей использовали акриламид (АА) (Sigma-Aldrich, чистота $\geq 98\%$) и ионную жидкость 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромид (BLDpharm, чистота 99,94%). В ка-

честве инициатора радикальной полимеризации применяли персульфат калия (АО «Вектон», 98%). В качестве сшивающего агента был выбран N, N'-метилен-бис-акриламид (МБА) (abcг GmbH, чистота 97%). Для синтеза ионогелей использовали воду деионизированную, ацетон (ХИМПРЕАКТИВ, чда).

Экспериментальные данные получены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО «ИГХТУ».

Морфологию поверхности ионогелей исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) для получения данных по элементному составу синтезированных соединений.

Квантово-химические расчеты были выполнены в программе ORCA 6.0 с использованием метода DFT, функционала M06L и базисного набора def2-TZVP с дисперсионной поправкой D3. Метод сканирования расслабленной поверхности применялся для нахождения пути с минимальной энергией в реакции присоединения каждого из мономеров к растущему радикалу.

Методика синтеза полимерных ионных жидкостей.

В пробирку к раствору акриламида (1,4 ммоль) в 4 мл деионизированной воды добавляли персульфата калия (0,004 ммоль), N,N'-метилен-бис-акриламида (0,324 ммоль) и ионную жидкость (n ммоль). Реакционную смесь выдерживали в инертной среде в течение 20 мин., реакцию проводили при 70 °С в течение 3 ч на водяной бане при постоянном перемешивании. Полученные ионогели отфильтровывали и промывали ацетоном. Осадок высушивали в сушильном вакуумном шкафу при 50 °С до постоянной массы. Соотношение исходных компонентов и выход ионогелей представлены в таблице 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для синтеза ионогелей (ИГ) в качестве мономеров использовали акриламид и 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромид. Ионогели были получены методом радикальной полимеризации в водной среде. Степень сшивания всех ионогелей была постоянной. ИЖ, используемая в качестве второго сомомера, гигроскопична, поэтому ее включение в гель позволит увеличить его способ-

ность к водопоглощению [24]. Соотношение компонентов АА : ИЖ составляло от 50:1 до 1:1, соответственно, что позволило получить ионогели с различным составом. Сшитый полиакриламид (ПАА),

полученный в аналогичных условиях, был использован как контрольный образец.

Схема реакции образования ионогеля поли(акриламид/1-бутил-3-винил-1Н имидазол-3-иум бромид) представлена на рис. 1.

Таблица 1

Соотношение исходных мономеров и выход ионогелей
Table 1. Ratio of the initial monomers and yield of the ionogels

Образец	n ИЖ, ммоль	Массовое соотношение АА : ИЖ	Выход, %
ПАА	–	–	87
ИГ 1	0,022	20:1	90
ИГ 2	0,043	10:1	90
ИГ 3	0,087	5:1	88
ИГ 4	0,130	3,33:1	84
ИГ 5	0,216	2:1	69
ИГ 6	0,433	1:1	71

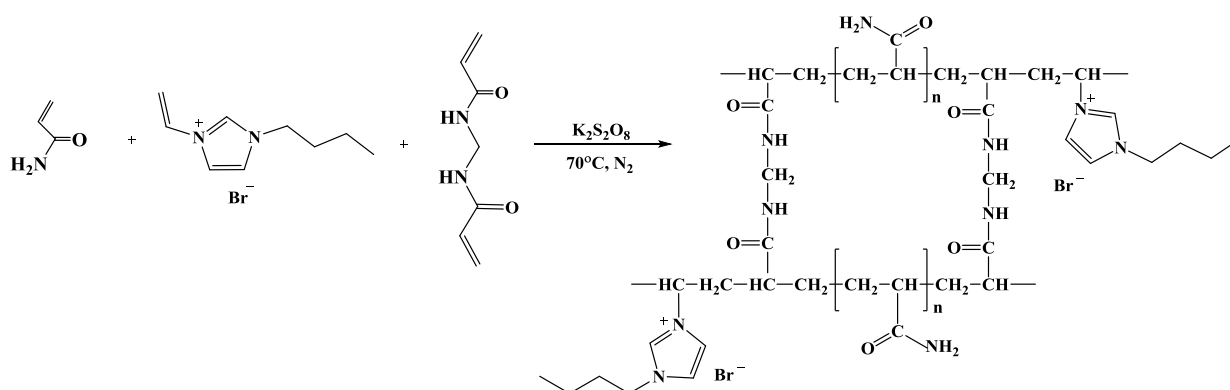


Рис. 1. Схема реакции получения ионогеля
Fig.1. Scheme of the reaction for producing an ionogel

Все синтезированные соединения хорошо набухают в воде, и при увеличении соотношения АА : ИЖ внешний вид полученных гелей в набухом состоянии меняется от белого до прозрачного. Для дальнейшего исследования сорбционных характеристик все ионогели выдерживали в деионизированной воде в течение суток. Затем набухшие образцы отфильтровывали, взвешивали, предварительно удалив лишнюю влагу с поверхности геля фильтровальной бумагой. Далее полученный ионгель помещали в вакуумный сушильный шкаф при 50 °С и высушивали до постоянной массы.

Гель-фракцию (Г, %) ионогелей рассчитывали по следующей формуле [25-27]:

$$Г = \frac{m_{\text{выс}}}{m_0} \cdot 100\%,$$

где m_0 – масса исходного ионогеля; $m_{\text{выс}}$ – масса высушенного ионогеля. Данные по гель-фракции ионогелей приведены в таблице 2.

Степень набухания (α , %) и содержание воды

(СВ, %) определяли по следующим формулам [25-27]:

$$\alpha = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{выс}}} \cdot 100\%, \text{ СВ} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{н}}} \cdot 100\%,$$

где $m_{\text{в}} = m_{\text{н}} - m_{\text{выс}}$, $m_{\text{в}}$ – вес воды в геле; $m_{\text{н}}$ – вес набухшего геля.

Рассчитанные значения содержания воды и степени набухания ионогелей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения гель-фракции, содержания воды и степени набухания ионогелей
Table 2. Gel fraction, water content and swelling degree of the ionogels

Образец	Г, %	СВ, %	α , %
ПАА	72,3	97,0	3314
ИГ 1	81,6	94,2	1656
ИГ 2	84,0	96,0	2620
ИГ 3	84,6	97,1	3909
ИГ 4	82,4	97,5	3826
ИГ 5	81,1	98,6	7033
ИГ 6	81,5	98,6	7114

Значения гелей-фракции полученных ионгелей выше, чем у немодифицированного гидрогеля ПАА, и составляют 81,1-84,6%. Степень набухания ИГ 3-6 превосходит значения α , % немодифицированного гидрогеля ПАА, наибольший показатель составляет 7114%. При этом степень набухания образцов постепенно выходит на плато, и ее численные показатели изменяются незначительно

при дальнейшем увеличении ИЖ в соотношении АА : ИЖ от 2:1 до 1:1, соответственно (рис. 2). Следует отметить, что до соотношения АА : ИЖ равное 10:1, наблюдается снижение степени набухания синтезированных ИГ ниже по сравнению со значением α , % немодифицированного гидрогеля ПАА.

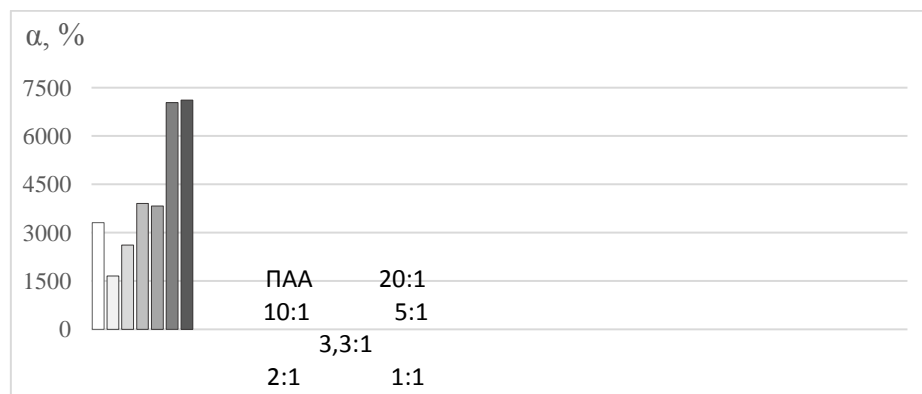


Рис. 2. Зависимость степени набухания ионгелей от соотношения АА : ИЖ
Fig. 2. Dependence of the ionogels swelling ratio on the AA : IL ratio

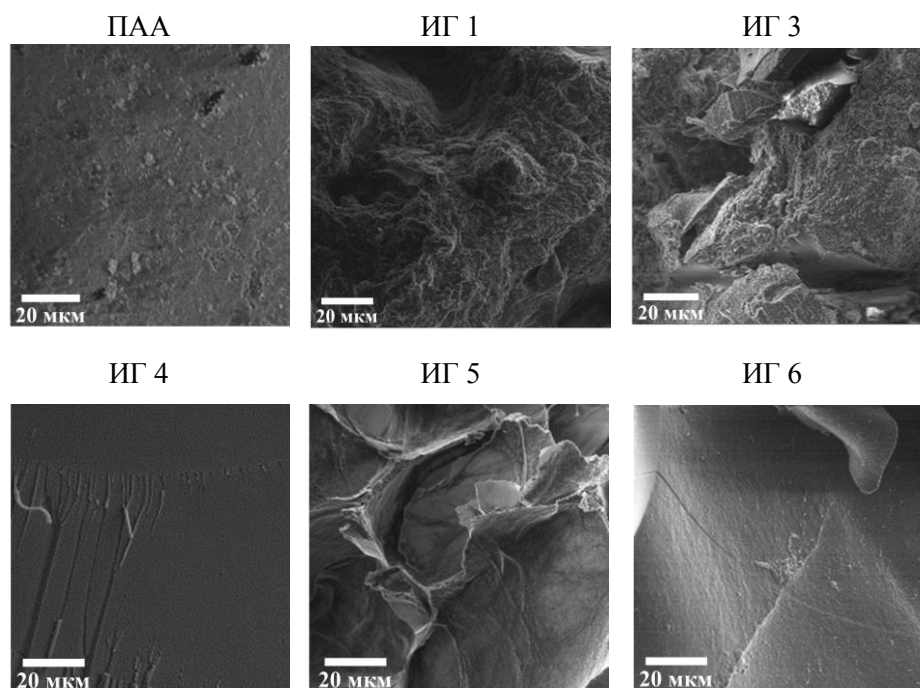


Рис. 3. Микрофотографии поверхности немодифицированного гидрогеля ПАА и ИГ
Fig. 3. The surface microphotographs of the unmodified PAA hydrogel and IGs

С помощью сканирующей электронной микроскопии была исследована морфология поверхности ионгелей. На рис. 3 представлены микрофотографии поверхности некоторых синтезированных ионгелей и немодифицированного гидрогеля ПАА, из которых видно, что поверхность ионгелей может быть, как рыхлой, так и гладкой.

С помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии было рассмотрено распределение элементов в синтезированных образцах гелей. На рис. 4 и в таблице 3 приведены данные ЭДС анализа с распределением углерода (C), азота (N), кислорода (O) и брома (Br) для синтезированных образцов. Из полученных данных следует, что во

всех синтезированных ионогелях присутствует Br, содержание которого в образцах возрастает при увеличении количества 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромида в массовом соотношении АА : ИЖ.

По элементному распределению кислорода и брома в полученных образцах можно оценить соотношение звеньев АА и ИЖ в синтезированных ионогелях. Данные элементного анализа показывают, что содержание акриламида в гелях выше, чем ИЖ.

Для обоснования причины меньшей реакционной способности ИЖ по сравнению с АА была проведена оптимизация структуры ИЖ и двух ее возможных радикальных частиц. С целью упрощения расчетов к исходной молекуле ИЖ присоединяли условный радикал водорода к одному из атомов углерода двойной связи C1 или C2 с образованием соответствующей радикальной частицы (рис. 5 *b* и *c*).

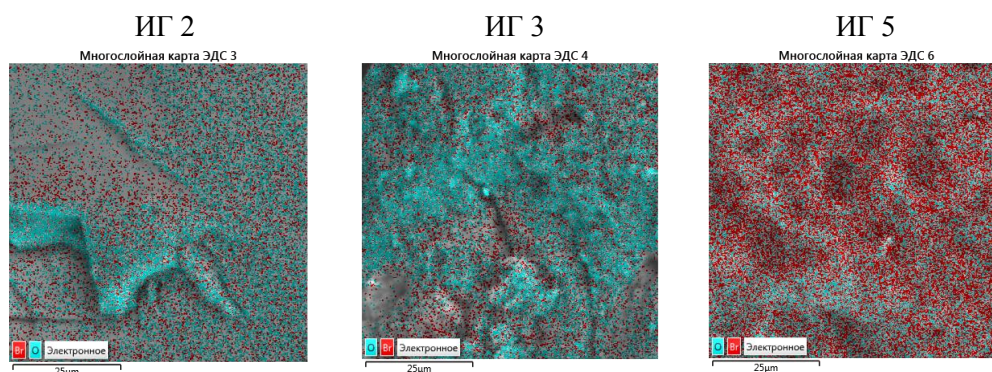


Рис. 4. ЭДС анализ распределения элементов О и Br в ионогелях
Fig. 4. EDS analysis of the O and Br distribution in the ionogels

Таблица 3

Распределение элементов в синтезированных ионогелях
Table 3. Distribution of elements in the synthesized ionogels

Образец	Вес. % элемента			
	C	N	O	Br
ИГ 1	54,30	16,29	29,17	0,25
ИГ 2	57,57	13,99	27,30	1,15
ИГ 3	56,53	17,01	25,39	1,08
ИГ 4	52,35	16,32	29,37	1,96
ИГ 5	60,85	14,86	19,02	5,27
ИГ 6	52,76	16,83	23,44	6,97

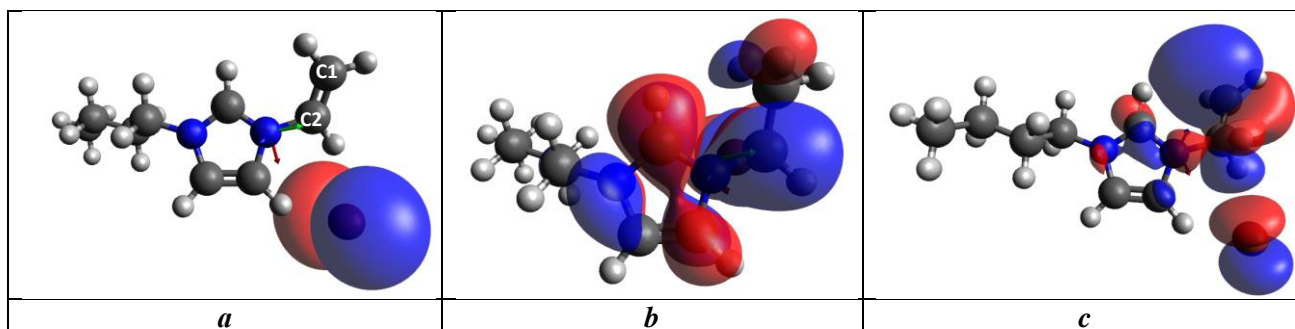


Рис. 5. Высшая занятая молекулярная орбиталь 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромида, рассчитанная с использованием функционала M06L: *a* – заряд 0 мультиплетность 1; *b* и *c* – заряд 0 мультиплетность 2

Fig. 5. Highest occupied molecular orbital of 1-butyl-3-vinyl-1H-imidazol-3-ium bromide calculated using the M06L functional
a – charge 0 multiplicity 1; *b*, *c* – charge 0 multiplicity 2

На рис. 5 *a* представлена структура исходного мономера. Структура *b* была получена путем присоединения условного радикала Н к атому C1 ионной жидкости. Для оптимизированного фрагмента была визуализирована НОМО, которая пред-

ставлена на рис. 5 *b*. Структура *c* была получена путем присоединения условного радикала Н к атому C2 исходного мономера. Для оптимизированной структуры была построена НОМО, которая представлена на рис. 5 *c*. Для структуры *c* локализация

электрона, находящегося на высшей занятой молекулярной орбитали, наблюдается на атоме углерода C1, в то время как для структуры *b* наблюдается делокализация этого же электрона по азольному циклу ИЖ, что свидетельствует о стабилизации образующегося радикала и, как следствие, о торможении процесса полимеризации.

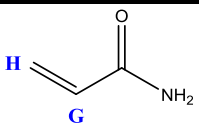
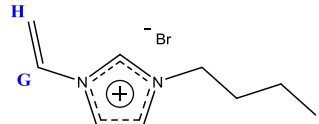
Таким образом, при проведении реакции радикальной полимеризации 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромида с акриламидом процесс образования растущего радикала может идти разными путями, один из которых приводит к торможению процесса. В результате квантово-химического расчета получены полные энергии для обеих радикальных частиц ИЖ, которые по значениям практически одинаковы и составляют -82620 эВ

(для структуры *b*) и -82619 эВ (для структуры *c*), что свидетельствует о равной вероятности образования обеих частиц при протекании радикальных процессов.

Далее было проведено моделирование процесса присоединения каждого из мономеров к растущему радикалу без учета сшивающего агента. Из полученных данных энергетически выгодным и наиболее вероятным для роста полимерной цепи является присоединение молекулы акриламида к растущему радикалу АА по типу «хвост к хвосту», «голова к хвосту» или ее присоединение к растущему радикалу ИЖ по типу «хвост к хвосту», «хвост к голове». В свою очередь, присоединение молекулы ИЖ к растущему радикалу АА энергетически затруднительно (таблица 4).

Таблица 4

Энергетические барьеры процесса полимеризации мономеров АА и ИЖ
Table 4. Energy barriers of the polymerization process of AA and IL monomers

Энергия, ккал/моль		Акриламид		ИЖ	
		Н*	G*	Н*	G*
	H	2	7,7	3,1	3,4
	G	6,5	10,8	8,4	9,4
	H	7,4	9	-	-
	G	9,1	10,7	-	-

Н*, G* - растущий радикал АА или ИЖ

Полученные расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными, подтверждая меньшую реакционную способность 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромида в реакции радикальной полимеризации с акриламидом, что сказывается на уменьшении выхода ионогелей при соотношении АА : ИЖ от 2 : 1 и обуславливает меньшее содержание ИЖ в ионогелях по сравнению с акриламидом.

ВЫВОДЫ

Таким образом, были получены полиакриламидные ионогели, содержащие 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромид, методом радикальной полимеризации в растворе. Методом сканирующей электронной микроскопии была исследована морфология поверхности образцов. С помощью ЭДС было проведено элементное картирование синтезированных образцов. Элементный анализ позволил оценить содержание 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромида в составе синтезированных гелей. Установлено, что с увеличением количества ИЖ в соотношении АА : ИЖ возрастает массовое

содержание Br в синтезированных образцах. Рассчитаны гель-фракция, содержание воды и степень набухания ионогелей. Определено, что степень набухания ионогелей в зависимости от соотношения АА : ИЖ изменяется неравномерно по сравнению с немодифицированным гидрогелем полиакриламида. С помощью квантово-химических расчетов показано, что ИЖ менее реакционноспособна по сравнению с акриламидом в реакции радикальной полимеризации. Проведенные квантово-химические расчеты согласуются с полученными экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания (Проект № FZZW-2023-0009).

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

The work was carried out with the financial support of the State Assignment (Project No. FZZW-2023-0009).

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Kabir S.M.F., Sikdar P.P., Haque B., Bhuiyan M.A.R., Ali A., Islam M.N. Cellulose-based hydrogel materials: Chemistry, properties and their prospective applications. *Progress in Biomaterials*. 2018. V. 7. P. 153–174. DOI: 10.1007/s40204-018-0095-0.
2. Ullah F., Othman M.B.H., Javed F., Ahmad Z., Akil H.M. Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C*. 2015. V. 57. P. 414–433. DOI: 10.1016/j.msec.2015.07.053.
3. Mitura S., Sionkowska A., Jaiswal A. Biopolymers for hydrogels in cosmetics: review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2020. V. 31. 50. DOI: 10.1007/s10856-020-06390-w.
4. Roy N., Saha N. PVP-based hydrogels: Synthesis, properties and applications. *Hydrogels: Synthesis, Characterization and Applications*. 2012. Chapter 8. P. 1–33. ISBN 978-1-61942-842-3.
5. Кусайнова Г.К., Жунусбекова Н.М., Искакова Т.К., Чинибаява Н.С., Худайберганов Н.С. Получение и модификация взаимопроникающих сеток на основе природных полимеров и производных акриловой кислоты. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 3. С. 83–90. DOI: 10.6060/ivkkt.20226503.6488.
6. Овсянникова В.С., Фуфаева М.С., Ким Е., Алтунни Л.К. Биоразложение в почве материалов на основе криогелей поливинилового спирта и крахмала. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 126–134. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.6t.
7. Roy N., Saha N., Kitano T., Saha P. Biodegradation of PVP-CMC hydrogel film: A useful food packaging material. *Carbohydrate Polymers*. 2012. V. 89. N 2. P. 346–353. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.03.008.
8. Marr P.C., Marr A.C. Ionic liquid gel materials: applications in green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*. 2016. V. 18. N 1. P. 105–128. DOI: 10.1039/C5GC02277K.
9. Fan X., Liu S., Jia Z. et al. Ionogels: recent advances in design, material properties and emerging biomedical applications. *Chemical Society Reviews*. 2023. V. 52. P. 2497–2527. DOI: 10.1039/D2CS00652A
10. Zhao K., Song H., Duan X., Wang Z., Liu J., Ba X. Novel Chemical Cross-Linked Ionogel Based on Acrylate Terminated Hyperbranched Polymer with Superior Ionic Conductivity for High-Performance Lithium-Ion Batteries. *Polymers*. 2019. V. 11. N 3. 444. DOI: 10.3390/polym11030444.
11. Xiao W., He T., Cui X. et al. Ionogel-Dominated Wearable Sensors for Reliable Health Monitoring. *SusMat*. 2025. e70026. DOI: 10.1002/sus2.70026.
12. Xiao S., Nie J., Tan R., Duan X., Ma J., Li Q., Wang T. Fast-response ionogel humidity sensor for real-time monitoring of breathing rate. *Materials Chemistry Frontiers*. 2019. N 3. P. 484–491. DOI: 10.1039/C8QM00596F.
13. Zhao G., Lv B., Wang H., Yang B., Li Z., Junfang R., Gui G., Liu W., Yang S., Li L. Ionogel-based flexible stress and strain sensors. *International Journal of Smart and Nano Materials*. 2021. V. 12. N 3. P. 307–336. DOI: 10.1080/19475411.2021.1958085.
14. Netto M.M.O., Gonçalves W.B., Li R.W.C., Gruber J. Biopolymer based ionogels as active layers in low-cost gas sensors for electronic noses. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. V. 315. 128025. DOI: 10.1016/j.snb.2020.128025.
15. Jiang H., Cheng Y., Zhang X. Progress of Ionogels in Flexible Pressure Sensors: A Mini-Review. *Polymers*. 2025. V. 17. N 8. 1093. DOI: 10.3390/polym17081093.

REFERENCES

1. Kabir S.M.F., Sikdar P.P., Haque B., Bhuiyan M.A.R., Ali A., Islam M.N. Cellulose-based hydrogel materials: Chemistry, properties and their prospective applications. *Progress in Biomaterials*. 2018. V. 7. P. 153–174. DOI: 10.1007/s40204-018-0095-0.
2. Ullah F., Othman M.B.H., Javed F., Ahmad Z., Akil H.M. Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering: C*. 2015. V. 57. P. 414–433. DOI: 10.1016/j.msec.2015.07.053.
3. Mitura S., Sionkowska A., Jaiswal A. Biopolymers for hydrogels in cosmetics: review. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2020. V. 31. 50. DOI: 10.1007/s10856-020-06390-w.
4. Roy N., Saha N. PVP-based hydrogels: Synthesis, properties and applications. *Hydrogels: Synthesis, Characterization and Applications*. 2012. Chapter 8. P. 1–33. ISBN 978-1-61942-842-3.
5. Kussainova G.K., Zhunusbekova N.M., Iskakova T.K., Chinibaeva N.S., Khudaibergenov N.S. Obtaining and modification of interpenetrating networks based on natural polymers and acrylic acid derivatives. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 3. P. 83–90. DOI: 10.6060/ivkkt.20226503.6488 (in Russian).
6. Ovsyannikova V.S., Fufaeva M.S., Kim E., Altunina L.K. Biodegradation in soil of polymeric materials based on polyvinyl alcohol and starch cryogels. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 126–134. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.6t (in Russian).
7. Roy N., Saha N., Kitano T., Saha P. Biodegradation of PVP-CMC hydrogel film: A useful food packaging material. *Carbohydrate Polymers*. 2012. V. 89. N 2. P. 346–353. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.03.008.
8. Marr P.C., Marr A.C. Ionic liquid gel materials: applications in green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*. 2016. V. 18. N 1. P. 105–128. DOI: 10.1039/C5GC02277K.
9. Fan X., Liu S., Jia Z. et al. Ionogels: recent advances in design, material properties and emerging biomedical applications. *Chemical Society Reviews*. 2023. V. 52. P. 2497–2527. DOI: 10.1039/D2CS00652A
10. Zhao K., Song H., Duan X., Wang Z., Liu J., Ba X. Novel Chemical Cross-Linked Ionogel Based on Acrylate Terminated Hyperbranched Polymer with Superior Ionic Conductivity for High-Performance Lithium-Ion Batteries. *Polymers*. 2019. V. 11. N 3. 444. DOI: 10.3390/polym11030444.
11. Xiao W., He T., Cui X. et al. Ionogel-Dominated Wearable Sensors for Reliable Health Monitoring. *SusMat*. 2025. e70026. DOI: 10.1002/sus2.70026.
12. Xiao S., Nie J., Tan R., Duan X., Ma J., Li Q., Wang T. Fast-response ionogel humidity sensor for real-time monitoring of breathing rate. *Materials Chemistry Frontiers*. 2019. N 3. P. 484–491. DOI: 10.1039/C8QM00596F.
13. Zhao G., Lv B., Wang H., Yang B., Li Z., Junfang R., Gui G., Liu W., Yang S., Li L. Ionogel-based flexible stress and strain sensors. *International Journal of Smart and Nano Materials*. 2021. V. 12. N 3. P. 307–336. DOI: 10.1080/19475411.2021.1958085.
14. Netto M.M.O., Gonçalves W.B., Li R.W.C., Gruber J. Biopolymer based ionogels as active layers in low-cost gas sensors for electronic noses. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. V. 315. 128025. DOI: 10.1016/j.snb.2020.128025.
15. Jiang H., Cheng Y., Zhang X. Progress of Ionogels in Flexible Pressure Sensors: A Mini-Review. *Polymers*. 2025. V. 17. N 8. 1093. DOI: 10.3390/polym17081093.

16. Gonçalves W.B., Cervantes E.P., Padua A.C.C.S., Santos G., Palma S.I.C.J., Li R.W.C., Roque A.C.A., Gruber J. Ionogels based on a single ionic liquid for electronic nose application. *Chemosensors*. 2021. V. 9. N 8. 201. DOI: 10.3390/chemosensors9080201.
17. Gonçalves W.B., Teixeira W.S.R., Cervantes E.P., Mioni M.S.R., Sampaio A.N.C., Martins O.A., Gruber J., Pereira J.G. Application of an electronic nose as a new technology for rapid detection of adulteration in honey. *Applied Sciences*. 2023. V. 13. N 8. 4881. DOI: 10.3390/app13084881.
18. Viau L., Tourne-Petelil C., Devoisselle J.-M., Vioux A. Ionogels as drug delivery system: one-step sol-gel synthesis using imidazolium ibuprofenate ionic liquid. *Chemical Communications*. 2010. N 2. P. 261–263. DOI: 10.1039/b913879j.
19. Gao Y., Zhang W., Li L., Wang Z., Shu Y., Wang J. Ionic liquid-based gels for biomedical applications. *Chemical Engineering Journal*. 2023. V. 452. Part. 1. 139104. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139248.
20. Jastram A., Claus J., Janmey P.A., Kragl U. Rheological properties of hydrogels based on ionic liquids. *Polymer Testing*. 2021. V. 93. 107009. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106943.
21. Zhang J., Zhang W., Guo J., Yuan C., Yan F. Ultrahigh ionic liquid content supramolecular ionogels for quasi-solid-state dye-sensitized solar cells. *Electrochimica Acta*. 2015. V. 165. P. 98–104. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.02.244.
22. Tripathi A.K. Ionic liquid-based solid electrolytes (ionogels) for application in rechargeable lithium battery. *Materials Today Energy*. 2021. V. 20. 100643. DOI: 10.1016/j.mtener.2021.100643.
23. Tian F., Yu R., Zuo X. Bioinspired 3D printed elastomer-hydrogel hybrid for flexible ionotronics. *Chemical Engineering Journal*. 2024. V. 489. 151164. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151164.
24. Печникова Н.Л., Коробова В.Д., Любимцев А.В., Александрийский В.В., Агеева Т.А. Синтез полимерных ионных жидкостей на основе акриламида и 1-бутил-3-винил-1-н-имидазол-3-иум бромид. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2024. Т. 79. Вып. 3. С. 87–95. DOI: 10.6060/snt.20247903.00014.
25. Nier W., Yu H., Muiyang S., Zong L. Investigation on the Structure and Mechanical Properties of Highly Tunable Elastomeric Silk Fibroin Hydrogels Cross-Linked by Gamma-Ray Radiation. *ACS Applied Bio Materials*. 2019. V. 3. N 1. P. 721–734. DOI: 10.1021/acsabm.9b01062.
26. Rachel S.H., Mark A., Kalliopi D. Effect of Crosslinking Agent Concentration on the Properties of Unmediated Hydrogels. *Pharmaceutics*. 2015. V. 7. P. 305–319. DOI: 10.3390/pharmaceutics7030305.
27. Печникова Н.Л., Смирнов А.С., Любимцев А.В., Александрийский В.В., Агеева Т.А. Синтез гидрогелей полиакриламида с порфириновыми фрагментами в боковой цепи в присутствии имидазольных ионных жидкостей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 6. С. 73–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.7053.
16. Gonçalves W.B., Cervantes E.P., Padua A.C.C.S., Santos G., Palma S.I.C.J., Li R.W.C., Roque A.C.A., Gruber J. Ionogels based on a single ionic liquid for electronic nose application. *Chemosensors*. 2021. V. 9. N 8. 201. DOI: 10.3390/chemosensors9080201.
17. Gonçalves W.B., Teixeira W.S.R., Cervantes E.P., Mioni M.S.R., Sampaio A.N.C., Martins O.A., Gruber J., Pereira J.G. Application of an electronic nose as a new technology for rapid detection of adulteration in honey. *Applied Sciences*. 2023. V. 13. N 8. 4881. DOI: 10.3390/app13084881.
18. Viau L., Tourne-Petelil C., Devoisselle J.-M., Vioux A. Ionogels as drug delivery system: one-step sol-gel synthesis using imidazolium ibuprofenate ionic liquid. *Chemical Communications*. 2010. N 2. P. 261–263. DOI: 10.1039/b913879j.
19. Gao Y., Zhang W., Li L., Wang Z., Shu Y., Wang J. Ionic liquid-based gels for biomedical applications. *Chemical Engineering Journal*. 2023. V. 452. Part. 1. 139104. DOI: 10.1016/j.cej.2022.139248.
20. Jastram A., Claus J., Janmey P.A., Kragl U. Rheological properties of hydrogels based on ionic liquids. *Polymer Testing*. 2021. V. 93. 107009. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106943.
21. Zhang J., Zhang W., Guo J., Yuan C., Yan F. Ultrahigh ionic liquid content supramolecular ionogels for quasi-solid-state dye-sensitized solar cells. *Electrochimica Acta*. 2015. V. 165. P. 98–104. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.02.244.
22. Tripathi A.K. Ionic liquid-based solid electrolytes (ionogels) for application in rechargeable lithium battery. *Materials Today Energy*. 2021. V. 20. 100643. DOI: 10.1016/j.mtener.2021.100643.
23. Tian F., Yu R., Zuo X. Bioinspired 3D printed elastomer-hydrogel hybrid for flexible ionotronics. *Chemical Engineering Journal*. 2024. V. 489. 151164. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151164.
24. Pechnikova N.L., Korobova V.D., Lyubimtsev A.V., Aleksandriiskiy V.V., Ageeva T.A. Synthesis of polymeric ionic liquids based on acrylamide and 1-butyl-3-vinyl-1h-imidazole-3-ium bromide. *Modern high technology. Regional application*. 2024. V. 79. N 3. P. 87–95. DOI: 10.6060/snt.20247903.00014 (in Russian).
25. Nier W., Yu H., Muiyang S., Zong L. Investigation on the Structure and Mechanical Properties of Highly Tunable Elastomeric Silk Fibroin Hydrogels Cross-Linked by Gamma-Ray Radiation. *ACS Applied Bio Materials*. 2019. V. 3. N 1. P. 721–734. DOI: 10.1021/acsabm.9b01062.
26. Rachel S.H., Mark A., Kalliopi D. Effect of Crosslinking Agent Concentration on the Properties of Unmediated Hydrogels. *Pharmaceutics*. 2015. V. 7. P. 305–319. DOI: 10.3390/pharmaceutics7030305.
27. Pechnikova N.L., Smirnov A.S., Lyubimtsev A.V., Aleksandriiskiy V.V., Ageeva T.A. Synthesis of polyacrylamide hydrogels with porphyrin fragments in the side chain in the presence of imidazolium ionic liquids. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 6. P. 73–79. DOI: 10.6060/ivkkt.20246706.7053 (in Russian).

Поступила в редакцию(Received) 23.09.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 30.10.2025