

**СИНТЕЗ ПОЛИМЕРНЫХ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ АКРИЛАМИДА И 1-БУТИЛ-3-ВИНИЛ-1Н-ИМИДАЗОЛ-3-ИУМ БРОМИДА**

**Печникова Н.Л., Коробова В.Д., Любимцев А.В., Александрийский В.В., Агеева Т.А.**

Надежда Леонидовна Печникова (ORCID 0000-0001-7814-6411), Алексей Васильевич Любимцев (ORCID 0000-0002-9983-216X), Виктор Вениаминович Александрийский (ORCID 0000-0002-7986-6573), Татьяна Арсеньевна Агеева (ORCID 0000-0001-9445-4262)\*

НИИ Макрогетероциклических соединений, кафедра химии и технологии высокомолекулярных соединений, Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, Иваново, просп. Шереметевский, 7.

E-mail: peclin@mail.ru, vikakorobova13@gmail.com, lyubimtsev\_av@isuct.ru, nmr@isuct.ru, tageeva@isuct.ru\*

*В работе описан синтез водорастворимых полимерных ионных жидкостей на основе акриламида и 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромидом методом радикальной полимеризации в растворе. В зависимости от массового соотношения исходных мономеров содержание ионной жидкости в полимере составило от 0,85 до 10%. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии определены молекулярно-массовые характеристики полимеров. Было установлено, что повышение содержания ионной жидкости в полимерной цепи приводит к увеличению молекулярной массы соединений. Среднечисленные молекулярные массы полимерных ионных жидкостей составили от 67000 до 151000 Да. Методом сканирующей электронной микроскопии была исследована поверхность синтезированных полимеров и получены данные о распределении элементов в образцах с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Установлено, что с увеличением содержания ионной жидкости в реакционной среде, процентное содержание элемента Br в синтезированных полимерах также увеличивается. Определены размеры частиц полученных образцов в водных средах методом динамического рассеяния света. Показано, что с увеличением содержания звеньев ионной жидкости в полимере размер частиц в водных растворах увеличивается.*

**Ключевые слова:** полимерные ионные жидкости, водорастворимые полимеры, радикальная полимеризация, гигроскопичность, имидазолиевые ионные жидкости

**SYNTHESIS OF POLYMERIC IONIC LIQUIDS BASED ON ACRYLAMIDE AND 1-BUTYL-3-VINYL-1H-IMIDAZOLE-3-IUM BROMIDE**

**Pechnikova N.L., Korobova V.D., Lyubimtsev A.V., Aleksandriiskiy V.V., Ageeva T.A.**

Nadezhda Leonidovna Pechnikova (ORCID 0000-0001-7814-6411), Alexey Vasilevich Lyubimtsev (ORCID 0000-0002-9983-216X), Victor Veniaminovich Aleksandriiskiy (ORCID 0000-0002-7986-6573), Tatyana Arsenyevna Ageeva (ORCID 0000-0001-9445-4262)\*

Department of Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds, Research Institute of Macroheterocyclic Compounds, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Sheremetevskyave., 7.

E-mail: peclin@mail.ru, vikakorobova13@gmail.com, lyubimtsev\_av@isuct.ru, nmr@isuct.ru, tageeva@isuct.ru\*

*The synthesis of water-soluble polymeric ionic liquids based on acrylamide and 1-butyl-3-vinyl-1H-imidazol-3-ium bromide by radical solution polymerization is described. The content of the ionic liquid in the polymer ranged from 0.85 to 10% depending on the mass ratio of the initial monomers. The molecular weight characteristics of the polymers were determined by high-performance liquid chromatography. It was found that an increase in the content of the ionic liquid in the polymer chain leads to an increase in the molecular weight of the compounds. The number-average molecular*

*weights of the polymer ionic liquids ranged from 67000 to 151000 Da. The surface of the synthesized polymers was examined by scanning electron microscopy and data on the distribution of elements in the samples were obtained using energy-dispersive X-ray spectroscopy. It has been established that the percentage of the Br element in the synthesized polymers also grows with increasing content of the ionic liquid in the reaction medium. The particle sizes of the samples obtained in aqueous media were determined by the method of dynamic light scattering. It has been shown that the particle size in aqueous solutions increases when content of the ionic liquid units in the polymer rises.*

**Keywords:** polymer ionic liquids, water-soluble polymers, radical polymerization, hygroscopicity, imidazolium ionic liquids

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых полимерных материалов, применяемых в медицине, фармацевтике, электронных устройствах и датчиках является одной из главных задач современной химии. Полимеры для данных областей применения должны обладать определёнными свойствами: биодegradацией и биосовместимостью для медицинского применения, хорошей электропроводностью и стабильностью для их использования в электрохимических устройствах, а также устойчивостью к внешним воздействиям.

Перспективными материалами для решения таких задач являются полимерные ионные жидкости (ПИЖ), представляющие собой как полимеризованные ионные жидкости, так и модифицированные с помощью ионных жидкостей (ИЖ) неионные полимеры [1, 2]. Они обладают специфическими характеристиками, сочетающими в себе свойства как ионных жидкостей, так и высокомолекулярных соединений.

Стоит отметить, что ионные жидкости традиционно рассматривают в качестве так называемых «зеленых растворителей» [3, 4], поэтому их использование считается безопасным для окружающей среды, а соединения, полученные на их основе, являются интересными материалами и находят применение в литий-ионных батареях как полиэлектролиты [5-7], в качестве катализаторов [8-11], антибактериальных средств [12, 13], стационарной фазы в газовой хроматографии [14]. На основе ПИЖ могут быть получены также материалы, обладающие высокой термической стойкостью [15, 16].

Несомненно, такие материалы являются очень интересными для их дальнейшего изучения и перспективными в различных областях медицины, науки и техники. В связи с этим, целью данной работы является синтез полимерных ионных жидкостей на основе акриламида (АА) и 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромиды, а также исследование физико-химических свойств полученных соединений.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

Для синтеза ПИЖ использовали акриламид (АА) (Sigma-Aldrich, чистота  $\geq 98\%$ ), который был дважды очищен перекристаллизацией из хлороформа [17], а также ионную жидкость 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромид (BLDpharm, чистота 99,94%). ИЖ использовали без дополнительной очистки. В качестве сшивающего агента был выбран N,N'-метилден-бис-акриламид (МБА) (abcGmbH, чистота 97 %), который перед использованием перекристаллизовывали из ацетона. Инициатор радикальной полимеризации - динитрилобисизомасляной кислоты (ДАК) (ВЕКТОН, ч), дважды перекристаллизованный из этилового спирта [18]. Для синтеза ПИЖ без дополнительной очистки использовали диметилсульфоксид (ДМСО) (ВЕКТОН, хч), воду деионизованную, хлороформ (ЭКОС – 1, хч), ацетон (ХИМПРЕАКТИВ, чда).

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

Степень чистоты исходных соединений (акриламид, ДАК, N, N'-метилден-бис-акриламид) контролировали на газовом хроматомаксиметре GCMS-QP2010 Ultra.

Молекулярно-массовые характеристики синтезированных полимерных ионных жидкостей определяли с помощью высокоэффективного жидкостного хроматографа Prominence LC-20AD, снабжённом рефрактометрическим детектором RID-20 Аи спектрофотометрическим детектором SPD-20 А при 40°C. Анализ проводили на колонке «PL aquagel-ОНMixed-M» (длина 300 мм, внутренний диаметр 7,5 мм, размер частиц 8 мк.) фирмы «AgilentTechnologies». В качестве элюента применяли 0,01 М водный раствор NaNO<sub>3</sub>. Скорость потока подвижной фазы составила 1 мл/мин. Калибровку проводили по стандартам полиэтиленгликоля с известными молекулярными массами. С помощью спектрофотометрического детектора SPD-20А в аналогичных условиях при

254 нм регистрировали сигнал, соответствующий имидазолиевому кольцу в ПИЖ. Полученные хроматограммы были обработаны с помощью программного обеспечения LC Solution. Анализ размера частиц синтезированных ПИЖ проводили с помощью Photocor Compact-Z методом динамического светорассеяния. В качестве источника света выступал лазер с длиной волны  $\lambda = 659,8$  нм. Встроенным коррелятором Photocor FC осуществлялась обработка сигналов для авто- и кросс-корреляционных измерений. Для измерения размера частиц полученных соединений готовились водные растворы ПИЖ с концентрацией  $T = 0,002$  г/мл. Анализ проводился при  $25$  °С в стандартных цилиндрических кюветках с углом рассеяния  $20^\circ$ . Результаты измерений обрабатывали с помощью программного пакета «DynaLS».

Спектры  $1^H$  ЯМР (вн. ст.  $Me_4Si$ ) исходной ИЖ, немодифицированного полиакриламида (ПАА) и синтезированных ПИЖ были записаны на импульсном спектрометре высокого разрешения «AVANCE 500» в  $DMCO-D_6$  и  $D_{20}$  (рабочая частота 500 МГц при измерениях на ядрах  $1^H$ ).

С помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 проводили исследование морфологии поверхности полимеров с использованием энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) для получения данных по элементному составу ПИЖ. В режиме высокого вакуума образцы были рассмотрены при разрешении 5 мкм с ускоряющим напряжением 5-10

кВ. Образцы ПИЖ были предварительно покрыты углеродом с использованием установки для напыления токопроводящих покрытий Q150TES. Синтез ПИЖ проводили с использованием магнитной мешалки с подогревом FOURE'sScientificMIO102002.

**ОБЩАЯ МЕТОДИКА СИНТЕЗА ПОЛИМЕРНЫХ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

К раствору акриламида (1,4 ммоль) в 4 мл  $DMCO$  добавляли 0,006 ммоль ДАК и  $n$  ммоль 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромида. Реакционную смесь выдерживали в инертной среде в течение 20 мин., затем ставили на водяную баню и проводили синтез при  $70$  °С в течение 8 часов при постоянном перемешивании. После окончания реакции полимеризации полимеры осаждали хлороформом и отфильтровывали. Осадок промывали хлороформом и высушивали до постоянной массы в вакуумном сушильном шкафу при  $50$  °С. Соотношение мономеров и выход синтезированных ПИЖ представлены в табл. 1.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Методом свободнорадикальной полимеризации в растворе были получены полимерные ионные жидкости на основе акриламида и 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромида с различным массовым соотношением исходных компонентов (Табл. 1). В качестве образца сравнения был использован немодифицированный ПАА.

*Таблица 1*

**Соотношение исходных компонентов и выход ПИЖ  
Table 1 Ratio of the initial components and yield of the PIL**

Полимер	Мольное содержание $n$ ИЖ в исходной смеси, ммоль	Массовое соотношение АА : ИЖ	Выход, %
ПАА	–	–	78,10
ПИЖ 1	0,009	50:1	77,13
ПИЖ 2	0,021	20:1	89,20
ПИЖ 3	0,043	10:1	85,22
ПИЖ 4	0,087	5:1	62,37
ПИЖ 5	0,130	3,33:1	75,60
ПИЖ 6	0,173	2,5:1	44,30
ПИЖ 7	0,216	2:1	66,95

Процесс полимеризации проводили в среде  $DMCO$ , массовое соотношение исходных компонентов АА : ИЖ варьировалось от 50:1 до 2:1, соответственно, чтобы получить полимеры с раз-

личным содержанием ИЖ в полимерной цепи. Схема реакции полимеризации акриламида с 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромидом представлена на рис. 1.

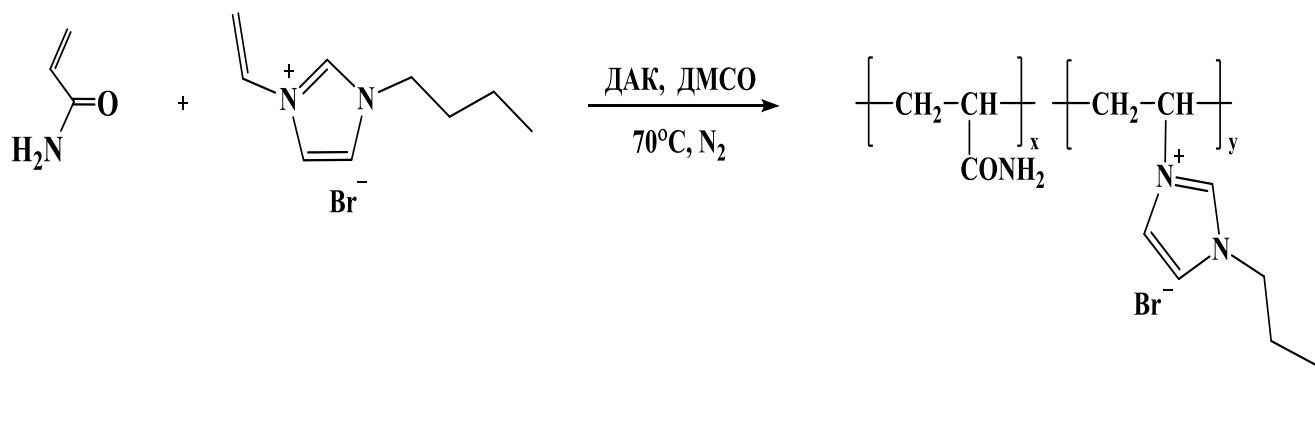


Fig. 1. Scheme of the reaction for producing a polymer ionic liquid  
 Рис. 1. Схема реакции получения полимерной ионной жидкости

В зависимости от соотношения исходных компонентов наблюдается изменение цвета синтезированных ПИЖ. С увеличением содержания ИЖ в соотношении АА : ИЖ оттенок синтезиро-

ванных соединений изменяется от белого до светло-жёлтого цвета. Также отмечено изменение структуры полученных ПИЖ от порошкообразной до стеклообразной формы (Рис. 2).



Fig. 2. Appearance of synthesized PILs  
 Рис. 2. Внешний вид синтезированных ПИЖ

Все полученные ПИЖ обладают хорошей растворимостью в воде. При введении ИЖ в полимерную цепь наблюдается увеличение гигроскопичности синтезированных образцов ПИЖ в отличие от немодифицированного ПАА. Отмечено уменьшение выхода полимерных ионных жид-

костей с увеличением содержания ИЖ в полимерной цепи. Молекулярно-массовые характеристики ПИЖ были определены методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с использованием рефрактометрического детектора RID-20А. Полученные данные представлены в табл.2.

Молекулярно-массовые характеристики синтезированных полимеров  
Table 2 Molecular mass characteristics of the synthesized polymers

Полимер	Среднечисленная молекулярная масса, $M_n$	Среднемассовая молекулярная масса, $M_w$	Полидисперсность, $M_w/M_n$
ПАА	48075	205611	4,28
ПИЖ 1	67068	163263	2,43
ПИЖ 2	84334	217652	2,58
ПИЖ 3	82935	203349	2,45
ПИЖ 4	94561	274331	2,90
ПИЖ 5	88340	203409	2,30
ПИЖ 6	150828	365972	2,43
ПИЖ 7	105698	254656	2,41

Молекулярные массы ПИЖ варьируются в пределах 67000-151000. С увеличением концентрации ИЖ в реакционной смеси молекулярная масса полученных сополимеров увеличивается. Синтезированные ПИЖ обладают меньшей полидисперсностью по сравнению с немодифицированным ПАА. С помощью УФ-детектора во всех образцах ПИЖ был зафиксирован сигнал, соответствующий поглощению имидазолиевого кольца в ИЖ. Времена удерживания пиков, зафиксированных рефрактометром и УФ-детектором, совпадают и варьируются от 7,233 до 7,704 мин. для разных ПИЖ, что свидетельствует химическом связывании звеньев ИЖ и акриламида в процессе радикальной полимеризации. Для дополнительного подтверждения полученных данных был проведен в аналогичных условиях анализ исходной ИЖ, время удерживания пика которой составило 9,621 мин. Несовпадение времени удерживания пиков на хроматограммах ПИЖ и ИЖ, полученных с помощью УФ-детектора, также свидетельствует о вхождении ИЖ в полимерную цепь.

В ЯМР-спектрах полимерных ионных жидкостей можно выделить область, к которой относятся протоны звеньев полиакриламида 2.33-0.99 м.д. и область, в которой расположены протоны азольного цикла: 8.98 – 8.51 м.д. ( $^1\text{H}$ ,  $\text{N}=\text{CH}-\text{N}$ ) и 7.71 – 7.21 м.д. ( $^1\text{H}$ ,  $\text{N}-\text{CH}=\text{CH}-\text{N}$ ;  $^1\text{H}$ ,  $\text{N}-\text{CH}=\text{CH}-\text{N}$ ). Сопоставление сигналов протонов звеньев мономеров позволяет определить соотношение звеньев ИЖ к звеньям акриламида.

Полученные данные приведены в табл. 3. Из приведенных данных следует, что с увеличением концентрации ИЖ в реакционной смеси увеличивается содержание звеньев ИЖ в полимере. Так, при массовом соотношении  $\text{AA} : \text{ИЖ} = 5 : 1$  содержание ИЖ в полимере составляет 6,7%, а при массовом соотношении акриламида  $\text{AA} : \text{ИЖ} = 2 : 1$  – 10%.

Также было проведено исследование морфологии поверхности полимерных ионных жидкостей в сравнении с немодифицированным ПАА с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3.

На рис. 3 показаны микрофотографии поверхности некоторых синтезированных ПИЖ и немодифицированного полиакриламида при разрешении 5 мкм.

На микрофотографиях видно, что с увеличением содержания в образце ИЖ поверхность изменяется от рыхлой до более гладкой. С помощью элементного картирования с использованием ЭДС было рассмотрено распределение элементов в синтезированных образцах ПИЖ.

На рис.4 приведены данные ЭДС анализа с распределением азота (N), кислорода (O) и брома (Br) без учёта углерода для ПИЖ 2, 4.

Из полученных данных следует, что во полученных ПИЖ присутствует элемент Br, содержание которого в образцах возрастает при увеличении содержания 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромид в массовом соотношении  $\text{AA} : \text{ИЖ}$ .

Соотношение звеньев акриламида и ионной жидкости в синтезированных ПИЖ  
Table 3. Ratio of acrylamide units and ionic liquid in the synthesized PILs

ПИЖ	Соотношение звеньев ИЖ : АА	Содержание ИЖ в полимере, %	x*	y*
1	1 : 117	0,85	936	2
2	1 : 34	2,86	1153	10
3	1 : 27	3,57	1125	13
4	1 : 14	6,67	1241	27
5	1 : 11	8,33	1139	32
6	1 : 17	5,56	2004	36
7	1 : 9	10	1338	46

\* x – количество звеньев акриламида в полимерной цепи;  
y – количество звеньев ИЖ в полимерной цепи

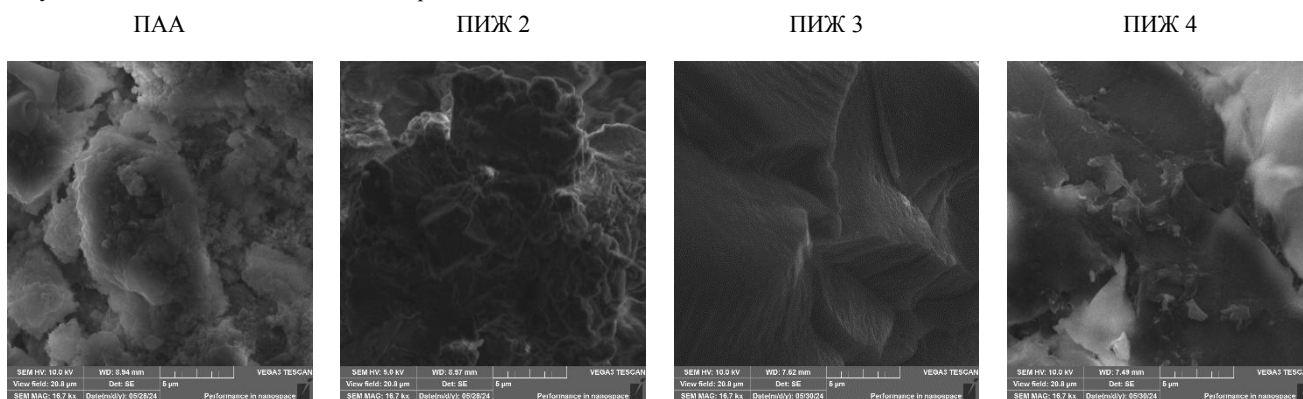


Fig. 3. The surface microphotographs of the unmodified PAA and PILs 2-4  
Рис. 3. Микрофотографии поверхности немодифицированного ПАА и ПИЖ 2-4

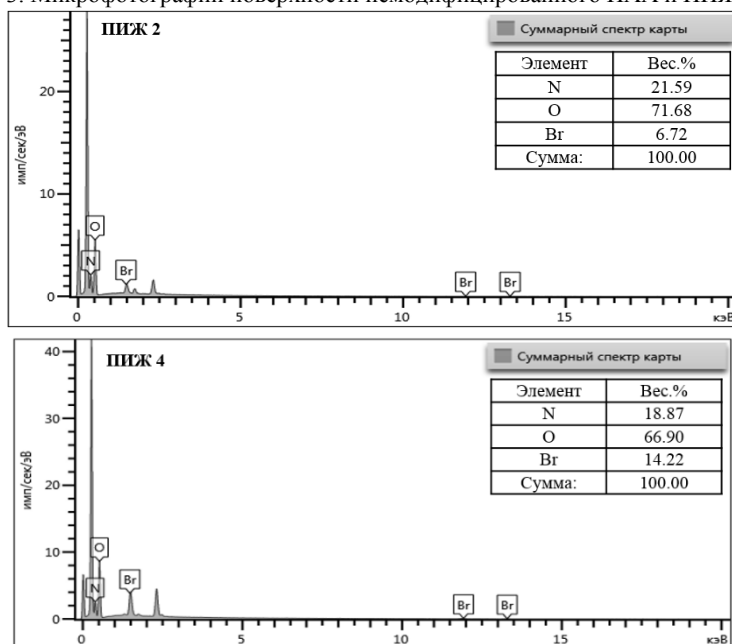


Fig. 4. EDS analysis of PILs 2, 4  
Рис. 4. ЭДС анализ ПИЖ 2, 4

Размер частиц синтезированных полимеров был исследован методом динамического рассеяния света. Для определения размеров частиц полученных ПИЖ предварительно были приго-

товлены их водные растворы с концентрацией  $T = 0,002$  г/мл. Полученные результаты размера частиц синтезированных ПИЖ и немодифицированного полиакриламида отображены в табл.4.

Таблица 4

Размеры частиц исследуемых образцов синтезированных полимеров в водных растворах  
Table 4. Particle sizes of the analyzed samples of the synthesized polymers in aqueous solutions

Полимер	Размер частиц, нм
ПАА	161 – 230
ПИЖ 2	309 – 453
ПИЖ 3	219 – 382
ПИЖ 4	257 – 353
ПИЖ 5	359 – 424
ПИЖ 6	215 – 308
ПИЖ 7	234 – 309

Все синтезированные ПИЖ имеют больший размер частиц в водных растворах по сравнению с немодифицированным ПАА. Очевидно, включение ионной жидкости в полимерную цепь способствует «разрыхлению» макромолекул в водных растворах.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработана методика синтеза полимерных ионных жидкостей на основе акриламида и 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромидом методом свободнорадикальной полимеризации в растворе. Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии определены молекулярно-массовые характеристики синтезированных ПИЖ и доказано химическое связывание ионной жидкости с полиакриламидом. Показано, что с увеличением концентрации 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромидом в реакционной среде молекулярная масса синтезированных сополимеров увеличивается. Методом ЯМР-спектроскопии определено соотношение звеньев 1-бутил-3-винил-1Н-имидазол-3-иум бромидом и акриламида в полученных полимерах. Наибольшее содержание ИЖ в полимере достигается при массовом соотношении АА : ИЖ = 2 : 1 и составляет 10%. С помощью сканирующей электронной

микроскопии было проведено элементное картирование ПИЖ. Элементный анализ подтвердил присутствие звеньев 1-бутил-3-винил-1 Н-имидазол-3-иум бромидом в структуре ПИЖ. Установлено, что с увеличением содержания ИЖ в исходной реакционной массе возрастает содержание элемента Вг в синтезированных образцах. Проведено также исследование ПИЖ методом динамического рассеяния света, которое показало увеличение размера частиц синтезированных соединений в водных растворах по сравнению с немодифицированным ПАА. Стоит отметить, что ПИЖ являются перспективными соединениями, поскольку сочетание свойств как полимеров, так и ионных жидкостей позволит получить уникальные материалы с возможностью варьирования их физико-химических свойств в зависимости от структуры и сходных мономеров и, таким образом, синтезировать гибридные соединения с заданными свойствами.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.*

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Lebedeva O.K., Kultin D.Y., Kustov L.M.** Polymeric ionic liquids: Here, there and everywhere. *European Polymer Journal*. 2023. V. 203. 112657. DOI:10.1016/j.eurpolymj. 2023.
2. **Qian W., Texter J., Yan F.** Frontiers in poly (ionic liquid) s: syntheses and applications. *Chemical Society Reviews*. 2017. – N4 (46). P. 1124-1159. DOI:10.1039/C6CS00620E.
3. **Лаврухина О.И., Амелин В.Г., Киш Л.К., Третьяков А.В.** Современная методология пробоподготовки при определении остаточных количеств пестицидов в объектах окружающей среды, биологических материалах и пищевой продукции. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 12 Вып. 66. С. 6-24. DOI: 10.6060/ivkkt. 20236612.6799.
4. **Тептерева Г.А., Пахомов С.И., Четвертнева И.А., Каримов Э.Х., Егоров М.П., Мовсумзаде Э.М., Евстигнеев Э.И., Васильев А.В., Севастьянова М.В., Волошин А.И., Нифантьев Н.Э., Носов В.В., Докичев В.А., Бабаев Э.Р., Роговина С.З., Берлин А.А., Фахреева А.В., Баулин О.А., Колчина Г.Ю., Воронов М.С., Староверов Д.В., Козловский И.А., Козловский Р.А., Тарасова Н.П., Занин А.А., Кривобородов Е.Г., Каримов О.Х., Флид В.Р., Логинова М.Е.** Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 9. С. 4-121. DOI: 10.6060/ivkkt. 20216409.6465.
5. **Sheikh S., Haghpanah Jahromi A.** Ionic liquids in green energy storage devices: lithium-ion batteries, supercapacitors, and solar cells. *Monatsh Chem*. 2024. N5(155). P. 383-399. DOI: 10.1007/s00706-024-03178-4.
6. **Выгодский Я.С., Мельник О.А., Шаплов А.С., Лозинская Е.И., Мальшккина И.А., Гаврилова Н.Д.** Синтез и ионная проводимость полимерных ионных жидкостей. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2007. №3(49). С. 413-420.
7. **Ohno H.** Design of ion conductive polymers based on ionic liquids. *Macromolecular Symposia*. 2007. N1(249-250). P. 551-556. DOI:10.1002/masy.200750435.
8. **Liu S., Su Q., Fu M., Deng L., Wang Y., Dong L., Liu Y., Ma X., Cheng W.** Core-shell dispersed polymeric ionic liquids as efficient heterogeneous catalyst for CO<sub>2</sub> conversion into cyclic carbonates. *Catalysis Letters*. 2023. V. 153. P. 2429-2442. DOI:10.1007/s10562-022-04103-2.
9. **Yang H., Wang L., Xu J., Lin L., Liu Y., Cui W., Zhi Y., Shan S., Miao Y.** Preparation of imidazole-based polymeric ionic liquid catalysts and their catalysis in the copolymerization with sulfur dioxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. V. 692. 133986. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.133986.
10. **Ding Jiang, Yuting He, Jinrui Zhang, Jie Yin, Jing Ding, Shuang Wang, Hongping Li.** Conjugate acid-base bifunctional polymeric ionic liquids (CAB-PILs) as efficient catalysts for CO<sub>2</sub> capture and subsequent glycidol cycloaddition reaction. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. V. 375. 121284. DOI:10.1016/j.molliq.2023.121284.
11. **Mahrim A.H.B., Tan T.A., Alias Y.B., Chang Y.-H., Manan N.S.A.** Ionic liquids/polyionic liquids assisted synthesis of CuO nanoparticles for CO<sub>2</sub> reduction to formic acid. *Ionics*. 2024. N2(30). P. 951-970. DOI:10.1007/s11581-023-05338-8.
12. **Zhang Y., Li S., Xu Y., Shi X., Zhang M., Huang Y., Liang Y., Chen Y., Ji W., Kim J.R., Song W., Yu D., Kim I.** Engineering of hollow polymeric nanosphere-supported imidazolium-based ionic liquids with enhanced antimicrobial activities. *Nano Res*. 2022. N6(15). P. 5556-5568. DOI:10.1007/s12274-022-4160-6.

## REFERENECES

1. **Lebedeva O.K., Kultin D.Y., Kustov L.M.** Polymeric ionic liquids: Here, there and everywhere. *European Polymer Journal*. 2023. V. 203. 112657. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.
2. **Qian W., Texter J., Yan F.** Frontiers in poly(ionic liquid)s: syntheses and applications. *Chemical Society Reviews*. 2017. – N4 (46). P. 1124-1159. DOI:10.1039/C6CS00620E.
3. **Lavrukhina O.I., Amelin V.G., Kish L.K., Tretyakov A.V.** Modern methodology of the sample preparation in pesticides residues determination in environmental bodies, biological matrices, and food. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 12. P. 6-24. DOI: 10.6060/ivkkt.20236612.6799
4. **Teptereva G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.H., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifanteyev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovsky I.A., Kozlovsky R.A., Tarasova N.P., Zanin A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.Kh., Flid V.R., Loginova M.E.** Renewable natural raw materials. structure, properties, application prospects *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 9. P. 4-121. DOI: 10.6060/ivkkt. 20216409.6465
5. **Sheikh S., Haghpanah Jahromi A.** Ionic liquids in green energy storage devices: lithium-ion batteries, supercapacitors, and solar cells. *Monatsh Chem*. 2024. N5(155). P. 383-399. DOI: 10.1007/s00706-024-03178-4.
6. **Vygodsky Ya.S., Melnik O.A., Shaplov A.S., Lozinskaya E.I., Malyshkina I.A., Gavrilova N.D.** Synthesis and ionic conductivity of polymer ionic liquids. *High molecular weight compounds. Seria*. 2007. No.3(49). pp. 413-420.
7. **Ohno H.** Design of ion conductive polymers based on ionic liquids. *Macromolecular Symposia*. 2007. N1(249-250). P. 551-556. DOI:10.1002/masy.200750435.
8. **Liu S., Su Q., Fu M., Deng L., Wang Y., Dong L., Liu Y., Ma X., Cheng W.** Core-shell dispersed polymeric ionic liquids as efficient heterogeneous catalyst for CO<sub>2</sub> conversion into cyclic carbonates. *Catalysis Letters*. 2023. V. 153. P. 2429-2442. DOI:10.1007/s10562-022-04103-2.
9. **Yang H., Wang L., Xu J., Lin L., Liu Y., Cui W., Zhi Y., Shan S., Miao Y.** Preparation of imidazole-based polymeric ionic liquid catalysts and their catalysis in the copolymerization with sulfur dioxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. V. 692. 133986. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.133986.
10. **Ding Jiang, Yuting He, Jinrui Zhang, Jie Yin, Jing Ding, Shuang Wang, Hongping Li.** Conjugate acid-base bifunctional polymeric ionic liquids (CAB-PILs) as efficient catalysts for CO<sub>2</sub> capture and subsequent glycidol cycloaddition reaction. *Journal of Molecular Liquids*. 2023. V. 375. 121284. DOI:10.1016/j.molliq.2023.121284.
11. **Mahrim A.H.B., Tan T.A., Alias Y.B., Chang Y.H., Manan N.S.A.** Ionic liquids/polyionic liquids assisted synthesis of CuO nanoparticles for CO<sub>2</sub> reduction to formic acid. *Ionics*. 2024. N2(30). P. 951-970. DOI:10.1007/s11581-023-05338-8.
12. **Zhang Y., Li S., Xu Y., Shi X., Zhang M., Huang Y., Liang Y., Chen Y., Ji W., Kim J.R., Song W., Yu D., Kim I.** Engineering of hollow polymeric nanosphere-supported imidazolium-based ionic liquids with enhanced antimicrobial activities. *Nano Res*. 2022. N6(15). P. 5556-5568. DOI:10.1007/s12274-022-4160-6.



13. **Sengupta A., Ethirajan S.K., Kamaz M., Jebur M., Wickramasinghe R.** Synthesis and characterization of antibacterial poly ionic liquid membranes with tunable performance. *Separation and Purification Technology*. 2019. V. 212. P. 307-315. DOI:10.1016/j.seppur.2018.11.027.
14. **RoeleveldK., DavidF., LynenF.** Comparison between polymerized ionic liquids synthesized using chain-growth and step-growth mechanisms used as stationary phase in gas chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2016. V. 1451. P. 135-144. DOI:10.1016/j.chroma.2016.05.007.
15. **Yang F., Zhao M., Smith D., Cebe P., Lucisano S., Allston T., Smith T.W.** Anomalous thermal characteristics of poly (ionic liquids) derived from 1-butyl-2, 3-dimethyl-4-vinylimidazolium salts. *Polymers*. 2022. N2(14). 254. DOI: 10.3390/polym14020254.
16. **MaJ., CaoC.** Effect of polymerized ionic liquids on thermal stability of poly (methyl methacrylate). *J. Therm. Anal. Calorim.*2023.V. 148. P. 12433-12443.DOI:10.1007/s10973-023-12562-x.
17. **ТоропцеваА.М., БелгородскаяА. В., Бондаренко В. М.** Лабораторный практикум по химии и технологии высокомолекулярных соединений. Л.: Химия, 1972. 416 с.
13. **Sengupta A., Ethirajan S.K., Kamaz M., Jebur M., Wickramasinghe R.** Synthesis and characterization of antibacterial poly ionic liquid membranes with tunable performance. *Separation and Purification Technology*. 2019. V. 212. P. 307-315. DOI:10.1016/j.seppur.2018.11.027.
14. **RoeleveldK., DavidF., LynenF.** Comparison between polymerized ionic liquids synthesized using chain-growth and step-growth mechanisms used as stationary phase in gas chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2016. V. 1451. P. 135-144.DOI:10.1016/j.chroma.2016.05.007.
15. **Yang F., Zhao M., Smith D., Cebe P., Lucisano S., Allston T., Smith T.W.** Anomalous thermal characteristics of poly (ionic liquids) derived from 1-butyl-2, 3-dimethyl-4-vinylimidazolium salts. *Polymers*. 2022. N2 (14). 254. DOI: 10.3390/ polym14020254.
16. **MaJ., Cao C.** Effect of polymerized ionic liquids on thermal stability of poly (methyl methacrylate). *J. Therm. Anal. Calorim.*2023.V. 148. P. 12433-12443. DOI: 10.1007/s10973-023-12562-x.
17. **Toroptseva. M., Belogorodskaya. V., Bondarenkov. M.** Laboratory practice of chemistry and technology of high-molecular compounds. L.: Chemistry, 1972. 416 p.

Поступила в редакцию 10.05.2024  
 Принята к опубликованию 10.07.2024  
 Received 10.05.2024  
 Accepted 10.07.2024