



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья
УДК 541.183.12
doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11540

Волокнистые аминокарбоксильные иониты ФИБАН К-6 и К-6М для очистки воды от ионов тяжелых металлов

Галина Владимировна Медяк[✉], Александр Акимович Шункевич, Валерий Жанович Ворса, Ольга Ивановна Исакович, Александр Петрович Поликарпов

Институт физико-органической химии национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь, MedyakG@ifoch.bas-net.by[✉]

Аннотация. Разработан новый одностадийный способ получения аминокарбоксильного ионита ФИБАН К-6 на основе полиакрилонитрильного волокна с использованием недорогих и доступных реагентов. Из волокнистого ионита ФИБАН К-6 получен новый аминокарбоксильный ионит ФИБАН К-6М с регулируемым набуханием в воде. Исследованы сорбционные свойства волокон ФИБАН К-6 и К-6М из многокомпонентных растворов. Показаны преимущества этих ионитов не только по сравнению с другими аминокарбоксильными ионитами ФИБАН К-3 и К-5, но и с лучшими сорбентами ионов тяжелых металлов ФИБАН X-1 и X-2 с иминодиацетатными группами. Установлено, что механические свойства волокнистого катионита ФИБАН К-6М позволяют переработать его с высоким выходом в нетканый материал или пряжу и использовать в виде картриджей в фильтрах очистки воды.

Ключевые слова: волокнистые иониты, механические свойства, сорбция, тяжелые металлы, очистка воды.
Для цитирования: Медяк Г.В., Шункевич А.А., Ворса В.Ж., Исакович О.И., Поликарпов А.П. Волокнистые аминокарбоксильные иониты ФИБАН К-6 и К-6М для очистки воды от ионов тяжелых металлов // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, № 4. С. 471-478.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11540>

Original article

Fibrous aminocarboxylic ion exchangers FIBAN K-6 and K-6M for purification of water from heavy metal ions

Galina V. Medyak[✉], Alexaner A. Shunkevich, Valery Zh. Vorssa, Olga I. Isakovich, Alexander P. Polikarpov

Institute of physical-organic chemistry of the national academy of sciences of Belarus, Minsk, Belarus, MedyakG@ifoch.bas-net.by[✉]

Abstract. A new one-stage method has been developed for the production of aminocarboxyl ion exchanger FIBAN K-6 based on polyacrylonitrile fibre using inexpensive and accessible reagents. The new aminocarboxyl ion exchanger FIBAN K-6M with controlled swelling in water was obtained from the fibrous ion exchanger FIBAN K-6. The sorption properties of FIBAN K-6 and K-6M fibres from multicomponent solutions were studied. The advantages of these ion exchangers are shown not only in comparison with other aminocarboxyl ion exchangers FIBAN K-3 and K-5, but also with the best sorbents of heavy metal ions FIBAN X-1 and X-2 with iminodiacetate groups. It has been established that the mechanical properties of the fibrous cation exchanger FIBAN K-6M allow to process it into non-woven material or yarn with high yield and use it in the form of cartridges in water purification filters.



Keywords: fibrous ion exchangers, mechanical properties, sorption, heavy metals, water purification.

For citation: Medyak G.V., Shunkevich A.A., Vorsa V.Zh., Isakovich O.I., Polikarpov A.P. Fibrous aminocarboxylic ion exchangers FIBAN K-6 and K-6M for purification of water from heavy metal ions. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(4): 471-478. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11540>

Введение

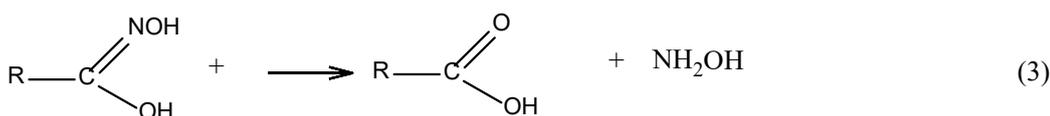
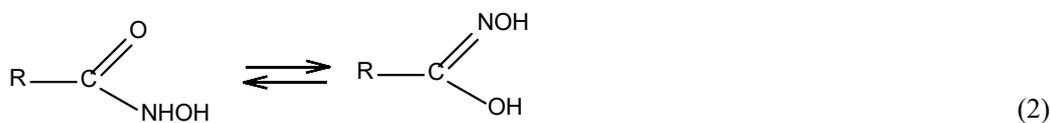
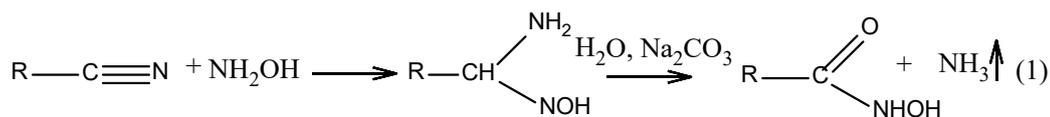
В условиях постоянного увеличения антропогенной нагрузки на окружающую среду ухудшается качество как поверхностных, так и подземных вод, в том числе по содержанию тяжелых металлов. К наиболее опасным металлам, загрязняющим воду, относят Pb, Cd, Hg, Zn, Mo, Ni, Co, Sn, Ni, Cu и V. Традиционные схемы очистки воды не всегда обеспечивают удаление ионов металлов до уровня ПДК. В современных методах водоочистки и водоподготовки активно используются мембранные и ионообменные технологии [1]. Создание селективных сорбентов, используемых в ионообменных технологиях, является актуальной задачей. Особенно большое значение приобретает разработка хемосорбционных волокон [2, 3], которые будут востребованы на мировом рынке для нужд промышленности и улучшения экологической обстановки. Важным обстоятельством для внедрения таких сорбентов служит себестоимость и конечная цена выпускаемой продукции. В ИФОХ НАН Беларуси разработаны и выпускаются в опытно-промышленном масштабе катиониты ФИБАН X-1 и X-2 с иминодиацетатными группами, отличающиеся повышенным сродством к ионам тяжелых металлов [4]. Одна из последних разработок Института – создание нового аминокарбоксильного катионита ФИБАН K-6, перспективного для использования в очистке технической и питьевой воды от катионов меди, свинца и кадмия [5]. Однако недостатком этого волокна является его высокое набухание в воде при достижении обменной емкости по карбоксильным группам 5 и более мг-экв/г.

Цель настоящей работы состояла в разработке способа получения аминокарбоксильного волокна с регулируемым набуханием, доступного по цене и не уступающего по сорбционным и механическим свойствам лучшим из уже выпускаемых волокнистых сорбентов.

Экспериментальная часть

Объекты исследования. В качестве объектов исследования использовали аминокарбоксильные иониты ФИБАН K-6 и K-6M. Объектами сравнения были выбраны иониты ФИБАН K-3 и K-5 с карбоксильными группами и иониты ФИБАН X-1 и X-2 с иминодиацетатными группами. Все катиониты были синтезированы на основе полиакрилонитрильного (ПАН) волокна Нитрон Д (сополимер 90.5% акрилонитрила, 8.5% метилакрилата и 0.95% натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфоуксусной кислоты).

Катионообменные волокна ФИБАН K-6 получали в одну стадию обработкой полиакрилонитрильного волокна раствором гидроксилamina (ГА) в присутствии избытка карбоната натрия для создания щелочной среды согласно уравнению (1) и диэтилен триамина (ДЭТА) в качестве сшивающего агента. В результате в состав волокон вводили группы гидроксамовой кислоты, которые образовывались при перегруппировке согласно уравнению (2) и подвергались последующему гидролизу в воде с образованием карбоксильных групп и высвобождением ГА по уравнению (3). Новое аминокарбоксильное волокно ФИБАН K-6M с регулируемым набуханием было получено путем сшивания волокон ФИБАН K-6 эпихлоргидрином.



Синтез катионита ФИБАН К-3 осуществляли в две стадии: сшивание ПАН волокна с помощью полиэтиленполиаминов (диэтилентриамина или триэтилентетрамина) и последующего гидролиза нитрильных групп [6]. ФИБАН К-5 синтезировали путем обработки ПАН волокна гидразингидратом и щелочного гидролиза нитрильных групп ПАН до карбоксильных [7]. Хелатные иониты ФИБАН Х-1 и Х-2 также синтезировали в две стадии [4, 8, 9]. На первой стадии проводили аминирование ПАН волокна этилендиамином (ЭДА) или ДЭТА из паровой фазы или из водного раствора. На второй стадии аминированное волокно алкилировали монохлоруксусной кислотой или ее натриевой солью.

Подготовка ионитов к испытаниям. Для определения обменной емкости образцы ионитов переводили в $H^+ - Cl^-$ форму обработкой 0.5 н раствором HCl с последующей отмывкой дистиллированной водой до pH 3.1-3.5. Для изучения сорбционных свойств образцы переводили в $H^+ - Na^+$ форму обработкой ацетатным буфером с pH 6. Влажность воздушно-сухих образцов определяли гравиметрически по потере массы после высушивания до постоянной массы при температуре $100 \pm 2^\circ C$.

Обменную емкость определяли титриметрически по методике, разработанной для полиамфолитов [10]. Величину набухания рассчитывали по разности масс сухого и набухшего образца, отцентрифугированного в течение 15 мин при

4000 об/мин (1290 г). Сорбцию ионов тяжелых металлов проводили в динамических условиях из модельного раствора, содержащего по $4 \cdot 10^{-2}$ мг-экв/г катионов меди, свинца, никеля, кобальта, кадмия и цинка на фоне 4 мг-экв/г катионов кальция, что соответствует среднему уровню жесткости воды в Беларуси. Для исключения выпадения осадков сорбцию изучали при постоянном значении pH, равном 6. Высота сорбционного слоя в колонке с внутренним диаметром 1.25 см составляла 3 см при плотности слоя сорбента 0.2 г/см^3 . Скорость потока, выраженная в величинах, пропорциональных объему сорбционного слоя, составляла $3.0 \div 3.2 \text{ BV/мин}$ и обеспечивала время контакта сорбента с раствором в течение 19-20 с.

Содержание ионов металлов в растворе до и после сорбции определяли на атомно-адсорбционном спектрофотометре Varian AA-200.

Деформационно-прочностные свойства волокон определяли с помощью электронной разрывной машины FM-27. Диаметр волокон измеряли с помощью микроскопа МБР-1, снабжённого микрометрической приставкой МОВ-1-15^x. Полученные данные статистически обработаны и приведены в виде среднего арифметического ($X_{cp.}$) с указанием доверительного интервала для математического ожидания измеренных / вычисленных величин, который установлен с надёжностью $\beta=0.95$ при числе измерений n .

Таблица 1. Физико-химические характеристики ионитов ФИБАН.

Table 1. Physico-chemical characteristics of FIBAN ion exchangers.

Тип ионита	Аминирующие и омыляющие реагенты	ОЕ, мг-экв/г		W, г H ₂ O/г ионита	
		по COOH	по аминогруппам	H ⁺ форма	H ⁺ – Na ⁺ форма
К-6	ДЭТА, ГА, Na ₂ CO ₃	4.2	1.8	0.9	2.52
К-6М	ДЭТА, ГА, Na ₂ CO ₃ , ЭПХГ	3.7	1.0	0.5-0.6	1.58
К-3	ДЭТА, ТЭТА, NaOH	5.4	1.7		
К-5	ГГ, NaOH	5.4	1.2		
Х-1	ЭДА, ДЭТА, CH ₂ ClCOOH	3.7	0.6	0.6-0.7	
Х-2	ЭДА, ДЭТА, CH ₂ ClCOOH	4.9	0.9	0.4-0.5	

ОЕ – обменная емкость, W – набухание в воде, ЭДА – этилендиамин H₂NCH₂CH₂NH₂, ДЭТА – диэтиленetriамин H₂N(CH₂)₂NH(CH₂)₂NH₂, ТЭТА – триэтилентетрамин H₂N(CH₂)₂NH(CH₂)₂NH(CH₂)₂NH₂, ГГ – гидразин гидрат H₂N–NH₂×H₂O, ГА – гидроксилламин NH₂OH, ЭПХГ – эпихлоргидрин CH₂–O–CH–CH₂Cl

Таблица 2. Динамическая сорбционная емкость (ДЕ) до проскока 5% исходной концентрации катионов металлов для волокнистых ионитов ФИБАН

Table 2. Dynamic sorption capacity (DC) up to a breakthrough of 5% of the initial concentration of metal cations for FIBAN fibrous ion exchangers

Марка ионита ФИБАН	ДЕ, мг-экв/г					
	Cu	Pb	Ni	Co	Cd	Zn
К-6	0.58	0.51	0	0	0.07	0.04
К-6М	0.42	0.83	0	0	0.9	0.12
К-3	0.30	0.30	0.04	0	0.17	0.05
К-5	0.24	0.31	0.08	0	0.08	0.05
Х-1	0.92	0.87	0.35	0.13	0.16	0.10
Х-2	0.80	0.63	0.16	0.15	0.15	0.15

Обсуждение результатов

Физико-химические характеристики объектов исследования представлены в таблице 1. Изученные иониты различаются по содержанию и природе карбоксильных групп, а также по набуханию и соотношению количества карбоксильных и аминогрупп.

В результате проведения сорбционных исследований показано, что сорбционная активность по ионам меди, свинца, кадмия и цинка для катионитов ФИБАН Х-1, Х-2 и К-6, К-6М значительно выше, чем для аминокарбоксильных ионитов ФИБАН К-3 и К-5 (таблица 2). При этом катионит ФИБАН К-6М не уступает катионитам ФИБАН Х-1 и Х-2, лучшим среди волокнистых сорбентов ионов тяжелых металлов. Это особенно важно с точки зрения получения эффективного

сорбента с использованием недорогих и малотоксичных реагентов.

Для оценки влияния скорости потока водных растворов через волокно на эффективность сорбции была исследована зависимость степени сорбции катионов меди или свинца от скорости потока. Данные приведены на рисунке 1 и в таблице 3. Установлено, что с увеличением скорости потока в 8 раз (от 10 до 80 ВВ/мин) степень извлечения ионов меди и свинца падает в 1.4 раза для ФИБАН К-3, в 1.3 раза для ФИБАН К-5, в 1.2 раза для ФИБАН Х-1 и К-6 и всего в 1.15 для ФИБАН Х-2 и К-6М. И это притом, что степени извлечения целевых ионов при скорости потока 0.18 м/с (10 ВВ/мин) для двух последних ионитов достигают 97 и 99% соответственно.

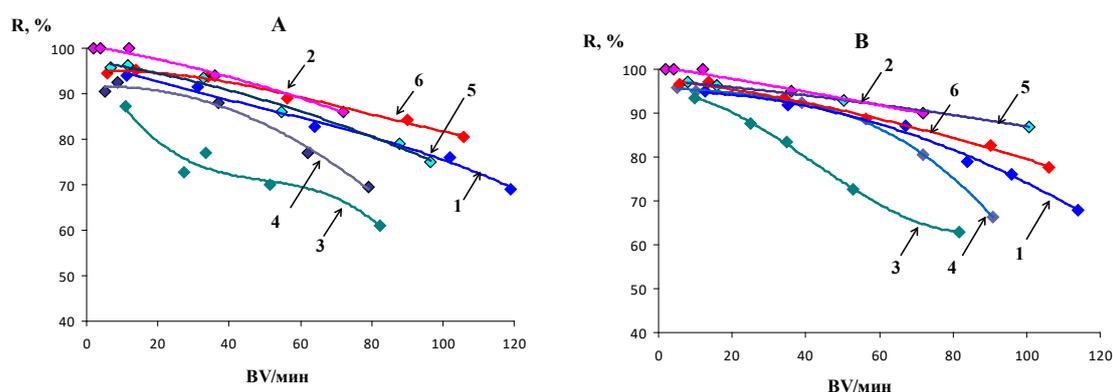


Рис. 1. Зависимость степени извлечения ионов Pb^{2+} (А) и Cu^{2+} (В) из водопроводной воды ионитами ФИБАН от скорости потока пропущенного раствора, BV/мин (BV – колоночный объем). 1 – К-6, 2 – К-6М, 3 – К-3, 4 – К-5, 5 – Х-1, 6 – Х-2.

Fig. 1. The dependence of the extraction degree of Pb^{2+} (A) and Cu^{2+} (B) ions from tap water by FIBAN ion exchangers on the flow rate of the passed solution, BV/min (BV – column volume). 1 – К-6, 2 – К-6М, 3 – К-3, 4 – К-5, 5 – Х-1, 6 – Х-2.

Таблица 3. Степени извлечения (R) катионов Cu и Pb волокнистыми ионитами ФИБАН из модельного раствора, приготовленного на водопроводной воде, при скорости потока 10 и 80 BV/мин

Table 3. Degrees of extraction (R) of Cu and Pb cations by FIBAN fibrous ion exchangers from a model solution prepared with tap water at a flow rate of 10 and 80 BV/min

Марка ионита ФИБАН	BV/мин	Cu, $C_0 \sim 60$ мкг/л	Pb, $C_0 \sim 100$ мкг/л
		R	R
К-6	10	0.95	0.90
	80	0.80	0.81
К-6М	10	0.99	0.99
	72	0.90	0.86
К-3	10	0.87	0.83
	80	0.63	0.62
К-5	10	0.92	0.91
	80	0.75	0.68
Х-1	10	0.96	0.96
	80	0.90	0.81
Х-2	10	0.97	0.95
	80	0.85	0.86

Важными для промышленного использования волокнистых ионитов являются их физико-механические свойства, которые обеспечивают возможность переработки этих материалов в различные текстильные формы: расчесанный штапель, нетканые материалы, пряжу. В свою очередь такие материалы легко могут быть интегрированы в существующие системы очистки воды, например, в виде картриджей, помещенных в корпуса магистральных фильтров.

Проведена оценка деформационно-прочностных характеристик образцов катионита ФИБАН К-6М в солевой и водородной формах, хелатного аминокарбоксильного ионита ФИБАН Х-1 и промышленного волокна Нитрон Д, который служил исходным материалом для получения катионообменных волокон (таблица 4). Средний диаметр волокон катионитов ФИБАН выше, чем у волокон Нитрон Д, что является результатом полимераналогичных превращений исходного

Таблица 4. Деформационно-прочностные характеристики исходного ПАН волокна и волокнистых ионитов ФИБАН на его основе (Доверительный интервал для математического ожидания измеренных величин рассчитан с надёжностью $\beta = 0.9^*$ и $\beta = 0.95$ при числе измерений n)

Table 4. Deformation-strength characteristics of the original PAN fibre and FIBAN fibrous ion exchangers based on it (the confidence interval for the mathematical expectation of the measured values was calculated with reliability $\beta = 0.9^*$ and $\beta = 0.95$ for number of measurements n)

Образец	Число измерений	d, мкм	F, г	σ , кг/мм ²	ϵ , %
ФИБАН К-6М (Н-форма)	15	29.7±2.3	8.1±1.0	11.9±1.1	56.9±23.1
ФИБАН К-6М (Na-форма)	10	28.8±2.3	4.7±0.9	7.13±0.6	62.9±9.3
Нитрон Д*	10 _≥ n _≥ 7	17.9±0.5	7.8±1.1	30.8±4.1	22.9±4.3
ФИБАН X-1 (Н-форма)*		23.2±1.1	5.5±1.9	12.6±3.9	44.6±5.3

d – диаметр одиночных волокон, F – разрывная нагрузка, σ – прочность на разрыв, ϵ – удлинение при разрыве.

волокна. Для волокон катионита ФИБАН К-6М в Н-форме усилие при разрыве выше, чем для волокон ФИБАН X-1, и практически не отличается от исходного волокна. Значительное уменьшение величины прочности при разрыве для катионитов ФИБАН по сравнению с исходным ПАН волокном можно объяснить увеличением площади сечения модифицированных волокон за счёт возрастания их диаметра ($\sigma=F/S$). В то же время удлинение при разрыве волокон ФИБАН К-6М, как и волокон ФИБАН X-1, заметно выше, чем исходных ПАН волокон, что может быть следствием пластификации Нитрона Д в результате полимераналогичных превращений и введения в его структуру гидрофильных групп. Поскольку удлинение при разрыве характеризует эластичность, то можно сделать вывод, что волокна ФИБАН более эластичные, по сравнению с исходным ПАН волокном, однако менее прочные. В то же время волокна катионита ФИБАН К-6М в солевой форме менее прочные и более эластичные, чем в водородной форме, что следует учитывать при их использовании в сорбционных системах.

Таким образом, деформационно-прочностные характеристики волокнистого катионита ФИБАН К-6М не уступают характеристикам хелатного волокна ФИБАН X-1, которое перерабатывается в

пряжу и нетканые материалы с высоким выходом и уже используется в составе картриджей очистки воды в бытовых фильтрах. В ноябре 2022 г. из аминокарбоксильного волокна ФИБАН К-6М (без стабилизирующих добавок) была наработана опытная партия (39 кг, два рулона) нетканого иглопробивного материала с поверхностной плотностью 470 и 437 г/м².

Заключение

Разработан новый одностадийный способ получения аминокарбоксильного ионита ФИБАН К-6 и новый аминокарбоксильный ионит ФИБАН К-6М с регулируемым набуханием в воде. Данные иониты относятся к недорогим среди аналогичной продукции, поскольку получены из промышленно выпускаемого ПАН волокна с использованием доступных реагентов. Установлено, что они обладают высокой сорбционной способностью по отношению к ионам меди, свинца, кадмия и цинка, сравнимой с таковой для лучших волокнистых сорбентов этих ионов ФИБАН X-1 и X-2. Показано, волокнистый катионит ФИБАН К-6М не уступает по механическим характеристикам хелатному волокну ФИБАН X-1, вследствие чего перспективен для использования в виде картриджей в составе фильтров очистки воды. Первая опытная партия нетканого материала из



волокна ФИБАН К-6М была произведена в 2022 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет из-

Список литературы

1. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: ДеЛи принт, 2004. 301 с.

2. Зверев М.П., Абдулхакова З.З. Волокнистые хемосорбенты. М.: Народный учитель, 2001. 176 с.

3. Soldatov V.S., Pawlowski L., Shunkevich, A.A., Wasag, H. New materials and technologies for environmental engineering. Part 1. Synthesis and structure of ion exchange fibers. Lublin. 2004. 127 p.

4. Грачек В.И., Шункевич А.А., Марцинкевич Р.В., Солдатов В.С. Хелатные сорбенты для очистки воды // *Экология и промышленность России*. 2005. № 1. С. 25-27.

5. Медяк Г.В., Поликарпов А.П., Шункевич А.А., Грачек В.И., Марцинкевич Р.В., Акулич З.И., Исакович О.И., Радкевич С.Е. Волокнистый сорбент ФИБАН К-6 и перспективы его использования для очистки воды // *Материалы XI Международного водно-химического форума г., Минск, 22-25 мая 2018 г.* С. 106-112.

6. Омельченко Т.Н., Елинсон И.С., Мартинович В.И., Солдатов В.С., Цыганков В.И. Сорбция ионов тяжелых металлов ионообменными волокнистыми материалами ФИБАН // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук*. 1999. № 3. С. 63-68.

7. Шункевич А.А., Марцинкевич Р.В., Медяк Г.В., Сокол В.П., Филанчук Л.П., Солдатов В.С. Сравнительная оценка волокнистых карбоксильных ионитов как средств очистки воды от ионов тяжелых металлов // *ЖПХ*. 2004. Т.77, № 2. С. 253-258.

8. Шункевич А.А., Медяк Г.В., Марцинкевич Р.В., Грачек В.И., Солдатов

вестных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

В.С. Волокнистые хелатные аминокарбоксильные иониты // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2001. Т.1, № 4. С. 741-748.

9. Грачек В.И., Лысенко Г.Н., Акулич З.И., Исакович О.И., Шункевич А.А. Исследование строения хелатных волокнистых ионитов методом ИК спектроскопии // *ЖОХ*. 2009. Т.79, № 3. С. 360-365.

10. Полянский Н.Г., Горбунов Г.В., Полянская Н.П. Методы исследования ионитов. М.: Химия. 1976. 208 с.

References

1. Ryabchikov B.E. Sovremennyye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispolzovaniya. M.: DeLi print, 2004, 301 p. (In Russ.)

2. Zverev M.P., Abdulkhokova Z.Z. Voloknistyye hemosorbenty. M., Narodnyy uchitel, 2001. 176 s. (In Russ.)

3. Soldatov V.S., Pawlowski L., Shunkevich A.A., Wasag H. New materials and technologies for environmental engineering. Part 1. Synthesis and structure of ion exchange fibers. Lublin. 2004. 127 p.

4. Grachek V.I., Shunkevich A.A., Marcinkevich R.V., Soldatov V.C. Helatnyye sorbenty dlya ochistki vody. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2005; 1: 25-27. (In Russ.)

5. Medyak G.V., Polikarpov A.P., Shunkevich A.A., Grachek V.I., Marcynkevich R.V., Akulich Z.I., Isakovich O.I., Radkevich S.E. Voloknistyy sorbent FIBAN K-6 i perspektivy ego ispolzovaniya dlya ochistki vody. *Materialy XI Mezhdunarodnogo vodno-himicheskogo foruma g., Minsk, 22-25 maya 2018 g.* P. 106-112. (In Russ.)

6. Omelchenko T.N., Elinson I.S., Martynovich V.I., Soldatov V.C., Cygankov V.I. Sorbcyya ionov tyazhelyh metallov ionoobmennymi voloknistymi materialami FIBAN.



Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. him. navuk. 1999; 3: 63-68. (In Russ.)

7. Shunkevich A.A., Marcynkevich R.V., Medyak G.V., Sokol V.P., Filanchuk L.P., Soldatov V.S. Sravnitel'naya ocenka voloknistykh karboksilnykh ionitov kak sredstv ochistki vody ot ionov tyazhelykh metallov. *ZhPH.* 2004; 77(2): 253-258. (In Russ.)

8. Shunkevich A.A., Medyak G.V., Marcynkevich R.V., Grachek V.I., Soldatov

B.C. Voloknistye helatnye aminokarboksilnye ionity. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2001; 1(4): 741-748. (In Russ.)

9. Grachek V.I., Lysenko G.N., Akulich Z.I., Isakovich O.I., Shunkevich A.A. Issledovanie stroeniya helatnykh voloknistykh ionitov metodom IK spektroskopii. *ZhOH.* 2009; 79(3): 360-365. (In Russ.)

10. Polyanskij N.G., Gorbunov G.V., Polyanskaya N.P. Metody issledovaniya ionitov. M., Himiya. 1976. 208 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Г.В. Медяк – к.х.н, вед. науч. сотрудник, Институт физико-органической химии, Национальная академия наук Минск, Беларусь

А.А. Шункевич – к.х.н, вед. науч. сотрудник, Институт физико-органической химии, Национальная академия наук Минск, Беларусь

В.Ж. Ворса – науч. сотрудник, Институт физико-органической химии, Национальная академия наук Минск, Беларусь

О.И. Исакович – науч. сотрудник, Институт физико-органической химии, Национальная академия наук Минск, Беларусь

А.П. Поликарпов – к.х.н, зав. лаб., Институт физико-органической химии, Национальная академия наук Минск, Беларусь

G.V. Medyak – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: medyak@ifoch.bas-net.by

A.A. Shunkevich – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: shunkevich@ifoch.bas-net.by

V.Zh. Vorsa – Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

O.I. Isakovich – Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

A.P. Polikarpov – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: mail: fiban@ifoch.bas-net.by

Статья поступила в редакцию 19.04.2023; одобрена после рецензирования 03.05.2023; принята к публикации 10.05.2023.

The article was submitted 19.04.2023; approved after reviewing 03.05.2023; accepted for publication 10.05.2023.