

ХІМІЯ ВЫСОКАМАЛЕКУЛЯРНЫХ ЗЛУЧЭННЯЎ
POLYMER CHEMISTRY

УДК 541.183:546.571

Поступила в редакцию 14.03.2017
Received 14.03.2017

**В. И. Грачек, Г. Н. Лысенко, А. А. Шункевич, Р. В. Марцынкевич,
О. И. Исакович, А. П. Поликарпов**

Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Беларусь

**ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА НОВОГО ВОЛОКНИСТОГО ХЕЛАТНОГО ИОНИТА
ФИБАН ХС-1**

Аннотация. Разработан метод хлорметилирования волокон полипропилена с привитым сополимером стирола и дивинилбензола и получено хлорметилированное привитое волокно (ХМВ) с высоким содержанием хлорметильных групп. ХМВ используется как промежуточный продукт для получения волокнистого хелатного сорбента с иминодицетатными группами ФИБАН ХС-1, который получается взаимодействием ХМВ с диметилловым эфиром иминодиуксусной кислоты и последующим гидролизом эфирных групп гидроксидом натрия. Методом ИК-Фурье спектроскопии исследована структура волокнистого хелатного ионита.

Ключевые слова: хелатный сорбент, ионит, иминодицетатные группы, привитое волокно, хлорметилирование, гидролиз, Фурье ИК-спектроскопия

Для цитирования. Получение и свойства нового волокнистого хелатного ионита ФИБАН ХС-1 / В. И. Грачек [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 4. – С. 74–80.

V. I. Grachek, G. N. Lysenko, A. A. Shunkevich, R. V. Martsynkevich, O. I. Isakovich, A. P. Polikarpov

Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF NEW FIBROUS CHELATE ION EXCHANGERS FIBAN XC-1

Abstract. A method for chloromethylation of polypropylene fibers with a graft copolymer of styrene and divinylbenzene was developed and chloromethylated grafted fiber (CGF) with a high content of chloromethyl groups was obtained. CGF was used as intermediate for the preparation of the FIBAN XC-1 fibrous chelate sorbent with iminodiacetate groups, which is obtained by reaction CGF with dimethyl ester of iminodiacetic acid dimethyl ester and subsequent hydrolysis of the ester groups by sodium hydroxide. The method of FTIR spectroscopy was used to study the structure of the fibrous chelate ion exchanger.

Keywords: chelate sorbent, ion exchanger, iminodiacetate groups, grafted fiber, chloromethylation, hydrolysis, FTIR spectroscopy

For citation. Grachek V. I., Lysenko G. N., Shunkevich A. A., Martsynkevich R. V., Isakovich O. I., Polikarpov A. P. Synthesis and investigation of new fibrous chelate ion exchangers FIBAN XC-1. *Vestsi Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk=Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*, 2017, no. 4, pp. 74–80 (In Russian).

Введение. Усиливающееся техногенное воздействие на окружающую среду отрицательно влияет на качество питьевой воды как подземных вод в районах водозаборов, так еще в большей степени открытых водоемов. Отмечено загрязнение питьевой воды катионами тяжелых и переходных металлов. Проблему очистки питьевой воды от ионов двухвалентного железа, марганца и других катионов тяжелых и переходных металлов позволяют решить новые волокнистые хелатные ионообменные материалы ФИБАН Х-1 и Х-2, созданные в Институте физико-органической химии НАН Беларуси на полиакрилонитрильной матрице [1–4]. Преимущества хелатных волокнистых ионитов перед гранульными в процессах очистки воды от ионов комплексообразующих металлов хорошо известны [5, 6]. Однако полиакрилонитрильная матрица не позволяет использовать иониты ФИБАН Х-1 и Х-2 для сорбции, разделения и концентрирования элементов в агрессивных средах при высоких температурах, прежде всего в сильнощелочных средах.

Поэтому представлялось интересным получить волокнистый хелатный аминокарбоксильный ионит на химически более инертной полиолефиновой матрице и оценить его ионообменные и сорбционные свойства по катионам тяжелых и цветных металлов.

В настоящее время производство подобных хелатных волокнистых ионитов организовано только в Японии. Корпорация Toray Inc. рекламирует волокно IONEKC с иминодиацетатными группами TIN 600, получаемое в результате проведения пяти основных стадий [7]. Конечное волокно дорого (150–180\$ за 1 кг), имеет невысокую статическую обменную емкость (СОЕ ~ 1,5 мг-экв/г), механические характеристики не позволяют перерабатывать его в нетканое полотно, выпускается в небольших количествах (десятки – сотни граммов) для аналитических целей [8, 9].

Цель настоящей работы – получить более дешевый хелатный ионит на химически стойкой матрице с удовлетворительными обменной емкостью и механическими свойствами.

Материалы и методы исследований. Исходной матрицей для получения ионита является полипропиленовое волокно, к которому радиационным методом с помощью изотопа ^{60}Co прививали 100–120% стирола (99%) и дивинилбензола (1%) [10] и получали привитое волокно (ПВ). На второй стадии ПВ хлорметиловали с получением хлорметилованного волокна (ХМВ).

В табл. 1 приведены условия хлорметилирования ПВ хлорсульфоновой кислотой (ХСК). В начале реакции приготовили элформ. Для его приготовления параформ (275 г) нагревали в метаноле (300 мл) в присутствии щелочи (0,5 г) при перемешивании на водяной бане при 60–65 °С в течение 30 мин. Известно, что при использовании растворимого в метаноле параформа, последний реагирует как мономерный формальдегид. В качестве источника хлористого водорода использовали хлорсульфоновую кислоту. Хлорметилирование ПВ проводили следующим образом: в реактор, снабженный обратным холодильником, капельной воронкой, термометром и мешалкой, заливали элформ, метанол и воду и осторожно по каплям прибавляли ХСК с такой скоростью, чтобы температура смеси не превышала 40 °С. Затем смесь охлаждали до комнатной температуры и загружали в реактор привитое волокно, предварительно набухшее в дихлорэтане. Волокно при перемешивании выдерживали ~ 15 мин в реакторе, а затем осторожно по каплям добавляли катализатор так, чтобы температура в реакционной смеси была не выше 30 °С. В качестве катализатора использовали 45%-ный водный раствор FeCl_3 . В некоторых опытах катализатором служило безводное SnCl_4 .

Таблица 1. Условия и результаты хлорметилирования ПВ

Table 1. Results and conditions of GF chloromethylation

Номер опыта	Условия проведения реакции						Результат	
	количество привитого волокна, г	V , мл элформа	V , мл метанола	V , мл воды	V , мл ХСК	V , мл FeCl_3	привес, г	Cl, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5,0	5,25	3,0	1,8	11,5	0,65	1,1	12,96
2	5,0	5,5	3,0	1,9	11,0	0,7	1,12	14,67
3	5,0	5,6	3,2	1,9	11,5	0,73	1,1	14,87
4	5,0	5,6	3,3	2,0	11,6	0,78	1,3	14,09
5	5,0	5,6	3,2	1,9	11,6	0,75	1,3	15,55
6*	5,0	2,8	1,6	1,0	5,8	0,75	1,0	11,18 10,24 7,16
7	5,0	4,2	2,5	1,5	8,7	0,75	1,0	11,92
8	5,5	4,2	2,5	1,5	8,7	0,75	0,9	11,26
1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	5,0	4,2	2,5	1,5	8,7	3,0 SnCl_4	0,7	9,65
10	5,0	4,2	2,5	1,6	9,6	3,0 SnCl_4	0,72	9,87
11	5,0	5,6	3,2	1,9	11,6	3,5 SnCl_4	0,76	10,01
12**	5,0	4,2	2,5	1,5	9,7	0,78	0,7	8,90
13**	5,0	5,6	3,2	1,9	11,6	0,75	0,72	8,96

Результаты исследований и их обсуждение. Проведенные исследования позволили подобрать оптимальные условия реакции и получить ХМВ с высоким содержанием хлора (до 15 мас.%) и хлорметильных групп. В частности, показано, что снижение количества ХСК (опыт №6), изменение порядка добавления катализатора (№ 12,13), а также замена FeCl_3 на SnCl_4 (№ 9–11) приводят к снижению содержания хлора и хлорметильных групп в ХМВ.

Для получения иминодиацетатного волокна использовали два способа. По первому способу с целью получения ПВ, содержащего первичные аминогруппы, ХМВ аминировали гексаметилен-тетрамином [11], затем для того чтобы получить иминодиацетатное волокно, аминированное ПВ алкилировали монохлоруксусной кислотой или натриевой солью монохлоруксусной кислоты в избытке алкилирующего агента [12]. Исследования показали, что этот метод не позволяет получить иминодиацетатные волокна с высокими значениями СОЕ по карбоксильным группам. Их содержание не превышало 1,33 ммоль/г.

По второму методу ХМВ обрабатывали диметилловым эфиром иминодиуксусной кислоты (ДЭИДУК) с последующим омылением эфирных групп раствором едкого натра. Хлорметилированное привитое волокно предварительно набухает в метаноле. Реакцию аминирования проводили в стеклянном реакторе, снабженном обратным холодильником. В реактор помещали метанол, добавляли гидроксид натрия и размешивали до полного растворения щелочи. Затем в него при перемешивании последовательно добавляли диметилловый эфир иминодиуксусной кислоты (ДЭИДУК) и предварительно набухшее в метилом спирте и отжатое волокно. Реакцию проводили при температуре 65–70 °С в течение 10 ч. По окончании реакции волокно извлекали из реактора, промывали метанолом, затем дистиллированной водой до отсутствия ионов Cl^- в промывной воде.

Омыление полученного полупродукта проводили в растворе 3М едкого натра при температуре 60–65 °С в течение 5 ч. Конечное волокно кондиционировали в цикле $\text{H}^+ - \text{Na}^+ - \text{H}^+$, отмывали дистиллированной водой и сушили в сушильном шкафу при температуре 60 °С. Влажность иминодиацетатного катионита определяли по ГОСТу 10213.3.2002, а статическую обменную емкость – согласно работе [13]. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2. Условия и результаты получения иминодиацетатного ионита

Table 2. Results and conditions of iminodiacetate ion exchanger production

Номер опыта	Обработка ДЭИДУК				Омыление полупродукта			
	количество волокна, ХМВ, г	количество ДЭИДУК, г	количество метанола, мл	количество NaOH, г	количество 3М NaOH, мл	набухание, гH ₂ O/г	СОЕ, ммоль/г	
							COOH	аминогруппа
1	2	12,18	20,5	2,6	60,0	0,44	3,22	0,44
2	2	6,0	10,0	1,3	12,0	0,6	3,43	0,35
3	2	12,18	20,5	2,6	60,0	0,48	3,52	0,79
4	2	8,0	20,4	1,7	15,5	0,52	3,75	0,43
5	5	31,0	52	6,5	60,0	0,51	3,29	0,31
6	5	20,0	33,5	4,25	40,0	0,46	3,25	0,52
7	6	24,0	40,0	5,1	15,5	0,56	3,77	0,37
8	10	23,3	79,0	9,0	100,0	0,38	3,67	0,35
9	10	20,0	67,0	8,5	78,0	0,56	3,39	0,45
10	10	40,0	67,0	8,5	78,0	0,46	3,82	0,36
11	2	8,0	13,4	1,7	15,5	0,60	3,72	0,62
12	20	80,0	134,0	17	155,0	0,44	3,58	0,47
13	2	8,0	13,4	1,65	14,5	0,64	4,01	0,38

Исследованы механические характеристики полученных ионитов при разных обменных емкостях. Из табл. 3 видно, что диаметр волокон растет с увеличением обменной емкости ионита, удлинение при разрыве уменьшается. В результате получили волокнистый ионит с высокими значениями СОЕ по карбоксильным группам от 3,2 до 4,0 ммоль/г и механическими характеристиками, позволяющими перерабатывать волокнистый катионит в нетканое полотно. Синтезированный ионит назвали ФИБАН ХС-1. Структура ФИБАН ХС-1 подтверждена данными ИК-спектроскопии.

Таблица 3. Влияние обменной емкости на механические характеристики ФИБАН ХС-1

Table 3. Influence of exchange capacity on the mechanical characteristics of FIBAN XC-1

Номер опыта	СОЕ, ммоль/г	Влажность, %	$d \pm \Delta d$, мкм	$F_{ср}$, г	$\sigma_{ср}$, кг/мм ²	$\epsilon_{ср}$, %
1	4,01	6,06	38,79±2,6	6,98	7,99	20,9
2	3,67	4,97	32,96±2,0	7,89	9,75	23,74
3	3,25	4,28	31,95±1,9	8,16	9,29	25,84

Образцы для регистрации ИК-спектров готовили по стандартной методике прессования тонко нарезанных волокон исследуемого образца с тщательно высушенным порошкообразным бромистым калием.

Концентрация образца в смеси составляла 1,5 %. ИК-спектр ФИБАН ХС-1 зарегистрирован в виде спрессованного диска с бромистым калием на Фурье ИК-спектрофотометре «Nicolet iS50» производства фирмы «Thermo Scientific» (США) при спектральном разрешении 4 см^{-1} и накоплении 256 сканов. Запись и обработку спектров осуществляли с помощью программного обеспечения OMNIC 9.0.

Общий вид ИК-спектра ФИБАН ХС-1 (рис. 1) показывает, что на фоне достаточно разрешенных полос поглощения (ПП) в интервале $2000\text{--}400 \text{ см}^{-1}$ присутствует широкая полоса при 1633 см^{-1} , асимметрия которой предполагает существование внутри нее некоторой структуры ПП с меньшими полуширинами. Интерпретация общего ИК-спектра ФИБАН ХС-1 затруднительна без привлечения дополнительных сведений о составе ПП 1633 см^{-1} . Поэтому был записан производный ИК-спектр этой полосы в виде спектра деконволюции (рис. 2) [15], позволяющий определить количество полос и точное их местоположение в спектре.

Выявлены четыре индивидуальные ПП при 1745 , 1684 , 1632 и 1573 см^{-1} . В спектре деконволюции ПП при 1745 см^{-1} соответствует характеристическому колебанию $\nu (\text{C}=\text{O})$ неионизированной

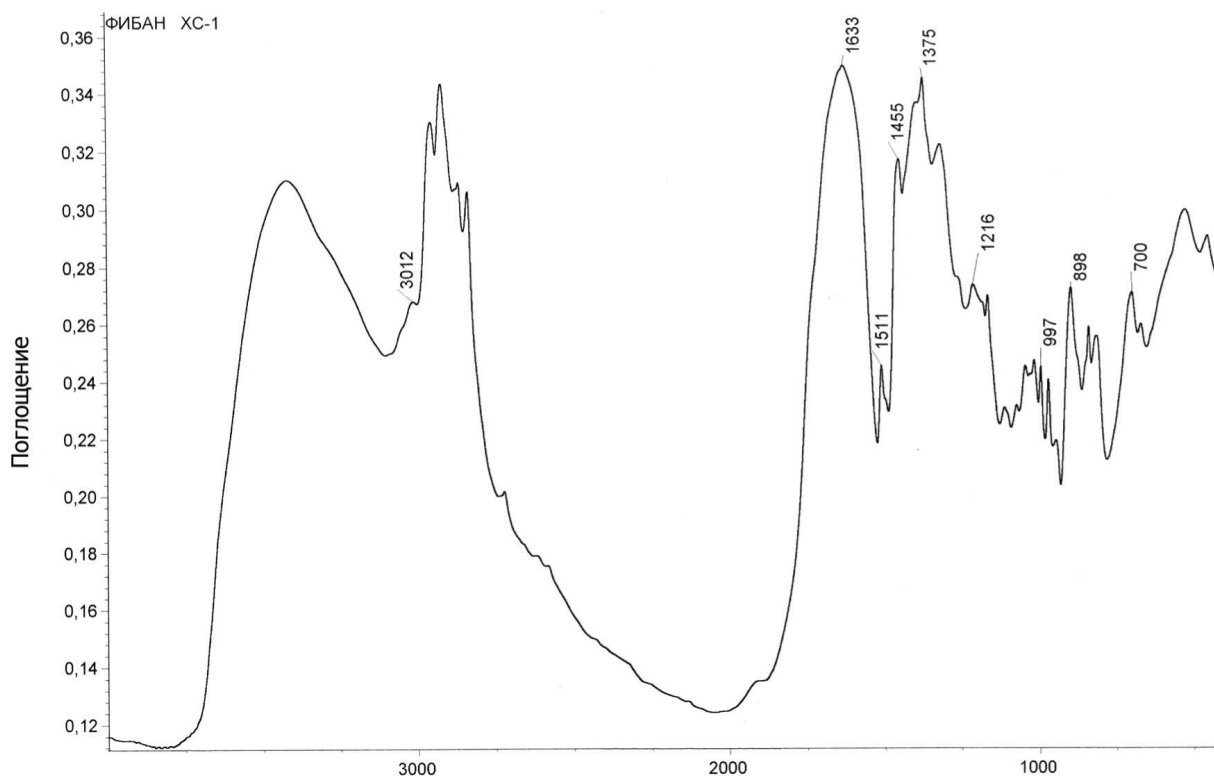


Рис. 1. Общий вид ИК-спектра ФИБАН ХС-1

Fig. 1. IR spectrum of FIBAN XC-1

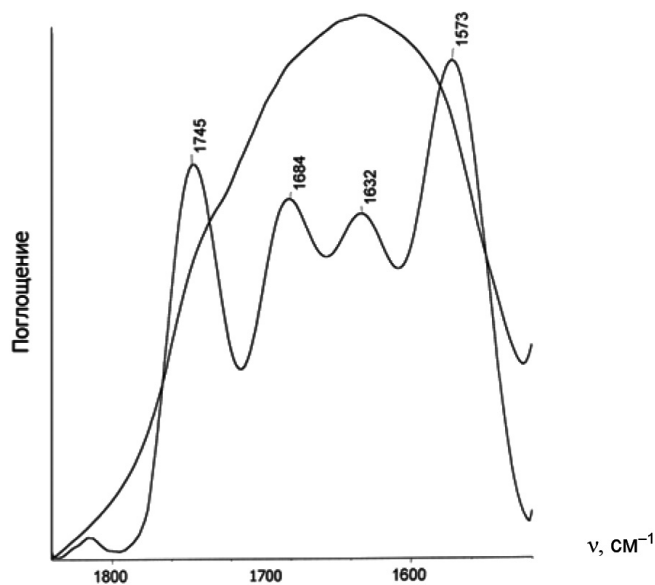


Рис. 2. Производный ИК-спектр ФИБАН ХС-1

Fig. 2. Derived IR spectra of FIBAN XC-1

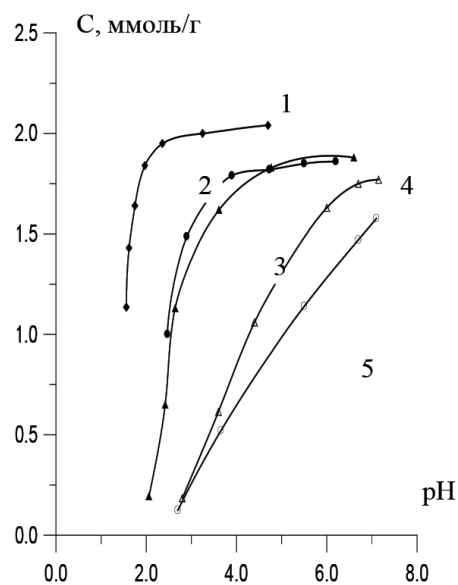


Рис. 3. Зависимость сорбции ионов металлов от pH равновесного раствора на ФИБАН ХС-1: 1 – Cu, 2 – Pb, 3 – Ni, 4 – Cd, 5 – Mn

Fig. 3. Metal ion adsorption on FIBAN XC-1 versus pH of equilibrium solution: 1 – Cu, 2 – Pb, 3 – Ni, 4 – Cd, 5 – Mn

карбоксильной группы COOH . К карбоксильной группе относится ПП при 3012 cm^{-1} , обусловленная колебанием ν (O-H), ПП при 1216 , соответствующая связи C-OH , и ПП при 898 cm^{-1} , характеризующая внеплоскостное колебание связи C-O-H [16]. ПП при 1573 cm^{-1} в спектре деконволюции является одним из колебаний группы COO^- .

Сопоставление данных ИК-спектров и СОЕ показывает, что в выбранных условиях получается иминодиацетатный катионит.

Проведены исследования зависимости сорбции катионов металлов от pH раствора в статическом режиме. Сорбцию проводили методом отдельных навесок на фоне 1 M NaCl из разбавленного раствора ионов металлов при комнатной температуре. Содержание ионов металлов в растворе определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре Varian AA-200, а pH растворов – на pH-метре ОР-265-1.

Результаты исследования сорбции на ионите ФИБАН ХС-1, приведенные на рис. 3, показывают, что ионит имеет максимальную сорбционную способность по двухзарядным катионам свинца и никеля в области pH 4,0–6,0. Для катионов меди максимальная сорбция происходит в области pH 2,0–5,0, а кадмия и марганца при pH 6,0–7,0. Верхний предел pH для сорбции каждого из ионов определяется началом выпадения гидроксида при данной концентрации.

Заключение. Таким образом, на основе химически инертной полипропиленовой матрицы разработаны условия получения нового волокнистого иминодиацетатного ионита с высоким содержанием иминодиацетатных групп. Методами ИК-спектроскопии, элементного анализа и определения содержания кислотных и основных функциональных групп подтверждена структура ионита. Показана способность ионита к селективной сорбции двухзарядных катионов цветных и тяжелых металлов.

Список использованных источников

1. Хелатные сорбенты для очистки воды / В. И. Грачек [и др.] // Экология и промышленность России. – 2005. – № 1. – С. 25–27.
2. Шункевич, А. А. Применение волокнистых сорбентов ФИБАН для концентрирования стронция-90 из сточных вод / А. А. Шункевич, В. И. Грачек, И. И. Уголев // Радиохимия. – 2007. – Т. 49, № 6. – С. 554–556.

3. Soldatov, V. S. Chemically active textile materials as efficient means for water purification / V. S. Soldatov, A. A. Shunkevich, I. S. Elinson // *Desalination*. – 1999. – Vol. 124. – P. 181–192.
4. Волокнистые аминокарбоксильные иониты / А. А. Шункевич [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2001. – Т. 1, № 4. – С. 741–748.
5. Блохин, А. А. Ионообменное извлечение палладия (II) из хлоридных растворов сложного состава / А. А. Блохин, Н. Д. Абовский, Ю. В. Мурашкин // *Журн. прикл. химии*. – 2007. – № 7. – С. 1089–1093.
6. Мясоедова, Г. В. Хелатообразующие сорбенты / Г. В. Мясоедова, С. Б. Савин. – М.: Химия. – 1980. – 279 с.
7. Shimamura, M. Polystyrene based functional fibers / M. Shimamura, K. Teramoto, T. Yoshioka // In: *Handbook of fiber Science and Technology*, Vol. III, High Technology Fiber, part. B, Eds. M. Zerw and J Preston, Marcel Dekker Inc. – New York: Basel, 1989. – P. 209–252.
8. New materials and technologies for environmental engineering. Part.I: Synthesis and structure of ion exchange fibers / V. Soldatov [et al.] // *Monographies of Polish Acad. Sci.* – Lublin. – 2004. – № 21. – 127 p.
9. Shimizu, H. Development of ion exchange technology in Japan. Part. III // *J. Ion Exchange*. – 1993. – № 4. – P. 2–19.
10. Солдатов, В. С. Волокнистые аниониты на основе полипропилена / В. С. Солдатов, А. И. Покровская, Р. В. Марцинкевич // *Журн. прикл. химии*. – 1984. – № 6. – С. 1410–1413.
11. Процесс получения аминотилфосфониевых ионитов. Пат. США № 5109074. – C08F 8/40; B01J 45/100, C01D 13/14.
12. Херинг, Р. Хелатообразующие ионообменники / Р. Херинг. – М.: Мир, 1971. – 279 с.
13. Полянский, Н. Г. Методы исследования ионитов / Н. Г. Полянский, Г. В. Горбунов, Н. П. Полянская. – М.: Химия, 1976. – 208 с.
14. Никоненко, Н. А. Спектральные характеристики углеводов на основе математической обработки ИК-спектров / Н. А. Никоненко // Автореф. канд. физ.-мат. наук. – Минск, 2000. – 21 с.
15. Купцов, А. Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А. Х. Купцов, Г. Н. Жижин. – М.: Физматлит, 2001. – 581 с.

References

1. Grachek V. I., Shunkevich A. A., Martsynkevich R. V., Soldatov V. S., “Chelate sorbents for water purification”, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2005, no. 1, pp. 25–27.
2. Shunkevich A. A., Grachek V. I., Ugolev I. I., Matveichuk S. V., “Application of FIBAN fibrous sorbents for concentration of ⁹⁰Sr from wastewater”, *Radiokhimiya* [Radiochemistry], 2007, vol. 49, no. 6, pp. 554–556.
3. Soldatov V. S., Shunkevich A. A., Elinson I. S., “Chemically active textile materials as efficient means for water purification”, *Desalination*, 1999, vol. 124, pp. 181–192.
4. Shunkevich A. A., Mediak G. V., Martsinkevich R. V., Grachek V. I., Soldatov V. S., “Fibrous aminocarboxylic ion exchangers”, *Corbsionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and chromatographic processes], 2001, vol. 1, no. 4, pp. 741–748.
5. Blokhin A. A., Abovskii N. D., Murashkin Iu. V., “Ion exchange extraction of palladium (II) from chloride solutions of complex composition”, *Zhurnal prikladnoi khimii* [Journal of Applied Chemistry], 2007, no. 7, pp. 1089–1093.
6. Miasoedova G. V., Savin S. B., *Khelatoobrazuiushchie sorbenty* [Chelating sorbents], Chemistry, Moscow, RU, 1980.
7. Shimamura M., Teramoto K., Yoshioka T., “Polystyrene based functional fibers”, in: *Handbook of fiber Science and Technology*, Vol. III, High Technology Fiber, part. B, in Zerw M. and Preston J. (ed.), Marcel Dekker Inc., New York, Basel, US, CH, 1989, pp. 209–252.
8. Soldatov V., Pawlowski L., Shunkevich A., Wasag H., *New materials and technologies for environmental engineering. Part. I: Synthesis and structure of ion exchange fibers*, Monographies of Polish Acad. Sci., Lublin, PL, no. 21, 2004.
9. Shimizu H., “Development of ion exchange technology in Japan. Part. III”, *Journal of Ion Exchange*, 1993, no. 4, pp. 2–19.
10. Soldatov V. S., Pokrovskaya A. I., Martsinkevich R. V., “Fibrous anion exchangers based on polypropylene”, *Zhurnal prikladnoi khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1984, no. 6, pp. 1410–1413.
11. Eiffler J., Joeken G., Schneider H.-P., The Dow Chemical Company, *Process for preparing an aminomethylphosphonic chelating resin*, US, Pat. № 5109074 A.
12. Hering R., *Khelatoobrazuiushchie ionoobmenniki* [Chelatbildende Ionenaustauscher], Translated by Barabanov V. A., Mir, Moscow, RU, 1971.
13. Polianskii N. G., Gorbunov G. V., Polianskaia N. P., *Metody issledovaniia ionitov* [Research methods of ion exchangers], Chemistry, Moscow, RU, 1976.
14. Nikonenko N. A., “Spectral characteristic of carbohydrates on the basis of mathematical treatment of IR spectra”, Abstract of Ph. D. dissertation, optics, The National Academy of Sciences of Belarus, the B. I. Stepanov Institute of Physics, Minsk, BY, 2000.
15. Kuptsov A. Kh., Zhizhin G. N., *Fur'e-KR i Fur'e-IR spektry polimerov* [Fourier-Raman and Fourier – IR spectra of polymers], Fizmatlit, Moscow, RU, 2001.

Информация об авторах

Грачек Валентина Ивановна – кан.хим. наук, вед. науч. сотрудник, Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: grachek@ifoch.bas-net.by.

Галина Николаевна Лысенко – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник, Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Александр Акимович Шункевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shunkevich@ifoch.bas-net.by.

Раиса Владимировна Марцынкевич – кан. хим. наук, науч. сотрудник, Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Ольга Ивановна Исакович – науч. сотрудник, Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Александр Петрович Поликарпов – канд. хим. наук, зав. лаб., Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Valentina I. Grachek – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grachek@ifoch.bas-net.by.

Galina N. Lysenko – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Aliaksandr A. Shunkevich – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shunkevich@ifoch.bas-net.by.

Raisa V. Martsynkevich – Ph. D. (Chemistry), Researcher, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Olga I. Isakovich – Researcher, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Aliaksandr P. Polikarpov – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory, Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).