

ХІМІЯ ВЫСОКАМАЛЕКУЛЯРНЫХ ЗЛУЧЭННЯЎ
POLYMER CHEMISTRY

УДК 661.183.123.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-286-293>

Поступила в редакцию 15.05.2022
Received 15.05.2022

А. А. Шункевич, А. П. Поликарпов, Г. В. Медяк, С. Д. Филиппович, З. И. Акулич

Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА НОВЫХ СИЛЬНООСНОВНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ АНИОНИТОВ

Аннотация. Отработана методика синтеза новых волокнистых анионитов с сильноосновными группами путем алкилирования слабоосновных анионитов на основе полиакрилонитрильного волокна с помощью двух алкилирующих агентов: эпихлоргидрина и этиленхлоргидрина. Исследовано влияние условий получения новых анионитов на их физико-химические свойства. Определены параметры синтеза: мольное соотношение «аминогруппы : алкилирующий агент», концентрация алкилирующего агента, время и температура реакции для получения анионитов с максимальной обменной емкостью по сильноосновным группам. Показаны удовлетворительные механические свойства новых сильноосновных волокон для их переработки в различные текстильные формы.

Ключевые слова: волокнистые аниониты, сильноосновные группы, синтез

Для цитирования. Синтез и свойства новых сильноосновных волокнистых анионитов / А. А. Шункевич [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 286–293. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-286-293>

A. A. Shunkevich, A. P. Polikarpov, G. V. Medyak, S. D. Filippovich, Z. I. Akulich

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

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF NEW STRONGLY BASIC FIBROUS ANION EXCHANGERS

Abstract. A synthesis method of new fibrous anion exchangers with strong base groups has been developed. The synthesis was carried out by alkylation of weakly basic anion exchangers based on polyacrylonitrile fiber using two alkylating agents: epichlorohydrin and ethylene chlorohydrin. The influence of the reaction conditions on the physicochemical properties of new anion exchangers was investigated. The synthesis parameters were determined: the molar ratio of “amino groups : alkylating agent”, the concentration of the alkylating agent, the reaction time and temperature – to obtain anion exchangers with maximum exchange capacity for strong base groups. New strongly basic fibers possess satisfactory mechanical properties allowing their processing into various textile forms.

Keywords: fibrous anion exchangers, strong base groups, synthesis

For citation. Shunkevich A. A., Polikarpov A. P., Medyak G. V., Filippovich S. D., Akulich Z. I. Synthesis and properties of new strongly basic fibrous anion exchangers. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 286–293 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-286-293>

Введение. Развитие промышленности и рост населения Земли приводят к увеличению загрязнения воздуха и воды. Основными загрязнителями воздуха являются диоксид серы, сероводород, аммиак, оксиды азота. Источниками выделения таких газов в атмосферу служат предприятия химической промышленности, металлургии, машиностроения и животноводческие комплексы. Наряду с задачей очистки воздуха [1, 2], важной проблемой остается очистка воды как питьевой, так и технической от ионов тяжелых металлов, нитратов, ПАВ и других токсических веществ [3–5]. Одним из современных методов очистки водных и воздушных сред является использование сорб-

ционных технологий с применением волокнистых ионообменных материалов. В частности, перспективными сорбентами кислотных примесей из воздуха зарекомендовали себя сильноосновные аниониты на основе полиакрилонитрильных (ФИБАН А-6, А-7, А-8; ПАН-АС-1; ВИОН-АС-1) и полипропиленовых (ФИБАН А-1, А-2, А-4) волокон [6–10].

Цель данной работы – разработать способ получения и изучить физико-химические свойства новых сильноосновных анионообменных волокон на основе полиакрилонитрильного волокна.

Экспериментальная часть. *Объекты исследования.* Основой для синтеза новых сильноосновных волокнистых анионитов послужили два вида волокон со слабоосновными группами. Первое волокно было получено из водного раствора N,N-диметилдипропилентриамина (ДМДПТА) [11]. Именно на этом образце проведены основные исследования. Второе синтезировано модификацией ПАН волокна из раствора ДМДПТА в этиленгликоле [12]. В качестве алкилирующих агентов были использованы недорогие промышленные реагенты эпихлоргидрин (ЭПХГ) и этиленхлоргидрин (ЭТХГ). В дальнейшем сильноосновный анионит, полученный с использованием ЭПХГ, называется ФИБАН А-12, а с использованием ЭТХГ – ФИБАН А-13.

Обменную емкость сильноосновных волокон по аминогруппам определяли в хлоридной форме анионита по методике анализа сильноосновных анионитов по Штамбергу [13].

Набухание волокон находили по разности масс сухого и набухшего образца после центрифугирования на центрифуге ОПн-8 при 4000 об/мин и ускорении $G = 900\text{ g}$ в течение 15 мин.

Механические характеристики волокон (разрывное усилие F , прочность σ и удлинение ε при разрыве) определяли на приборе FM-27. Диаметр моноволокон d измеряли на микроскопе МБР-1, снабженном микрометрической приставкой МОВ-1-15^х.

Результаты и их обсуждение. Физико-химические характеристики слабоосновных волокон ФИБАН А-11, модифицированных с целью введения сильноосновных групп, представлены в табл. 1.

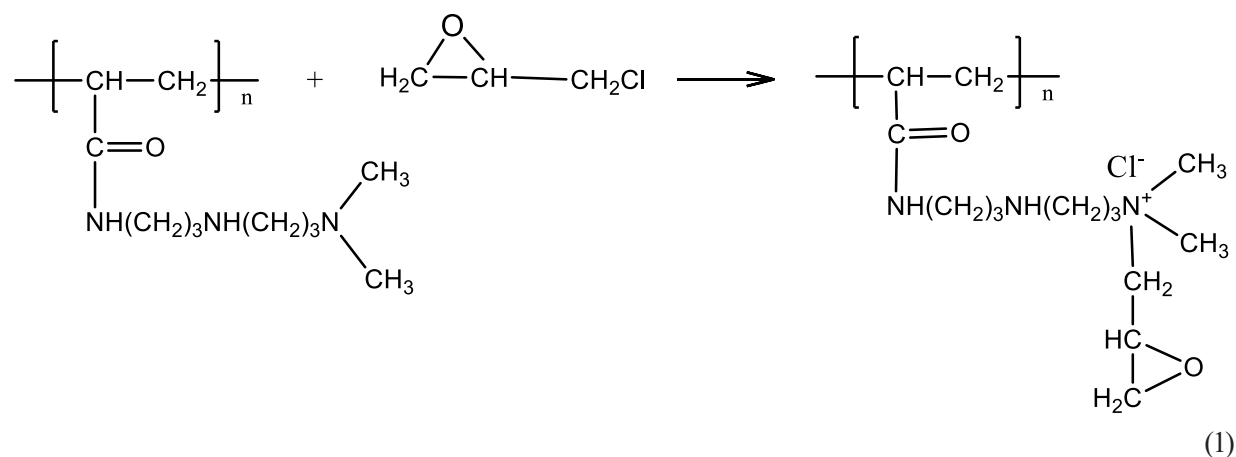
Таблица 1. Физико-химические характеристики слабоосновных анионитов ФИБАН А-11

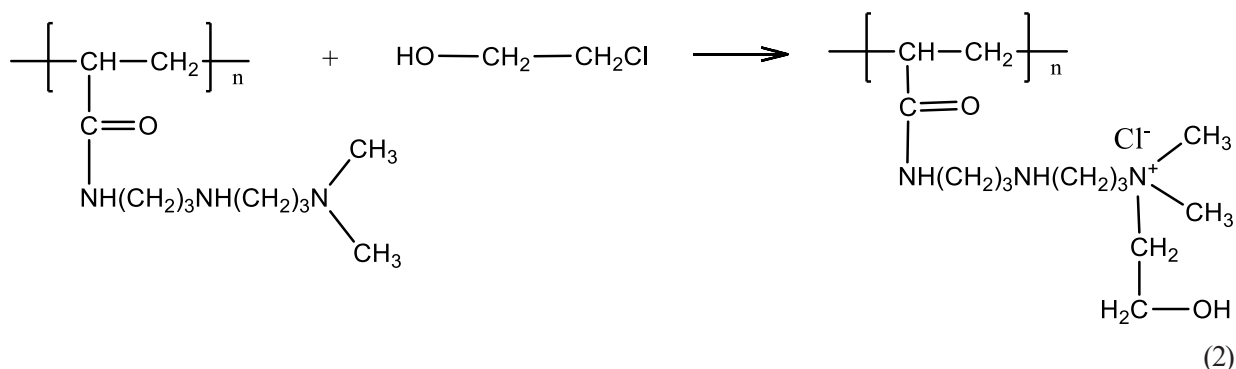
Table 1. Physicochemical characteristics of weakly basic anion exchangers FIBAN A-11

Тип ионита	Условия аминирования	ОЕ, мг-экв/г		W, г H ₂ O/г ионита
		по аминогруппам	по COOH	
1	Водный раствор ДМДПТА	5,88	0,24	1,24
2	Раствор ДМДПТА в этиленгликоле	6,27	0,05	2,23

Примечание. ОЕ – обменная емкость, W – набухание в воде.

Образование сильноосновных групп в результате алкилирования слабоосновных анионитов ФИБАН А-11 подтверждается их прямым определением по методу Штамберга. Реакции образования в волокне четвертичных аминогрупп с использованием ЭПХГ и ЭТХГ протекают преимущественно по следующим схемам:





Еще одной, скорее, теоретической возможностью появления в волокне сильноосновных групп может быть последовательное алкилирование вторичной аминогруппы слабоосновных волокон двумя молекулами эпихлоргидрина или этиленхлоргидрина. При этом на первой стадии образуется третичная аминогруппа, а после реакции с еще одной молекулой алкилирующего агента – четвертичная аминогруппа.

Таким образом, исходя из схем алкилирования (1) и (2) и предположения об участии в процессе вторичной аминогруппы, максимальное теоретически возможное количество молекул алкилирующего агента, присоединенных к одному структурному звену слабоосновного анионита, равно 3. Поэтому диапазон мольного соотношения ЭПХГ или ЭХТГ к слабоосновному аниониту (NR_1R_2) варьировали от 1 до 3 (табл. 2). Условия проведения синтеза в обоих случаях совпадали: время реакции 5 ч, концентрация ЭПХГ (или ЭХТГ) 10,0 %, температура 20 °С.

Таблица 2. Физико-химические свойства анионитов ФИБАН А-12 и А-13 в зависимости от мольного соотношения ЭПХГ : NR_1R_2

Table 2. Physicochemical properties of FIBAN A-12 and A-13 anion exchangers depending on molar ratio of EPCG : NR_1R_2

Марка анионита ФИБАН	Мольное соотношение ЭПХГ : NR_1R_2	Набухание, г H_2O /г	ОЕ по аминогруппам, мг-экв/г		
			слабые	сильные	общая
А-12	1,0	1,10	3,54	2,22	5,76
	1,5	1,05	3,44	2,23	5,67
	2,0	0,93	3,24	2,25	5,49
	2,5	0,91	3,12	2,36	5,48
	3,0	0,89	3,01	2,49	5,50
А-13	1,0	1,66	4,05	1,21	5,26
	1,5	1,60	4,19	1,11	5,30
	2,0	1,54	4,12	0,96	5,08
	2,5	1,52	3,86	0,71	4,57
	3,0	1,50	3,65	0,55	4,20

Анализ результатов (табл. 2) показал, что аниониты ФИБАН А-12, полученные алкилированием слабоосновного анионита 1 (табл. 1) с помощью ЭПХГ, содержат наряду с сильноосновными группами большое количество слабоосновных аминогрупп. Оценка влияния мольного соотношения ЭПХГ : NR_1R_2 на обменную емкость алкилированного ионита свидетельствует о низкой вероятности образования четвертичных групп из вторичных аминогрупп исходного слабоосновного волокна. Вместе с тем анионит ФИБАН А-12 отличается в 2 раза более высоким содержанием аминогрупп по сравнению с сильноосновным волокном ФИБАН А-6 [14, 15], используемым в настоящее время в системах кондиционирования воздуха «чистых комнат». В то же время для лучшего образца ФИБАН А-6 соотношение сильноосновных (2,0 мг-экв/г) и слабоосновных (0,8 мг-экв/г) групп смещено в сторону сильноосновных, что может быть связано с большей легкостью алкилирования третичных групп слабоосновного анионита ФИБАН А-5 [14, 15], чем третичных и вторич-

ных аминогрупп, присутствующих в ФИБАН А-11. Набухание ФИБАН А-6 (1,2 г H₂O/г) близко к набуханию ФИБАН А-12 в первом опыте (табл. 2).

Следует отметить, что величина набухания сильноосновных анионитов ФИБАН А-12 в воде меньше, чем у исходных слабоосновных. Причем с увеличением мольного соотношения ЭПХГ : NR₁R₂ величина набухания анионитов уменьшается (табл. 2). Это можно объяснить двумя причинами. Первая связана с введением довольно гидрофобных заместителей в аминогруппы и прежде всего с образованием более гидрофобных третичных аминогрупп из вторичных. Вторая причина может быть вызвана наличием в ЭПХГ двух активных функциональных групп, которые могут реагировать с двумя аминогруппами, обеспечивая внутри- или межмолекулярное сшивание аминогрупп макромолекул.

При алкилировании слабоосновного анионита ЭХТГ (табл. 2) полученные аниониты ФИБАН А-13 содержат большое количество слабоосновных и небольшое количество сильноосновных аминогрупп, меньше чем у ФИБАН А-6 и ФИБАН А-12. С ростом мольного соотношения ЭТХГ : NR₁R₂ прослеживается снижение обменной емкости как по сильноосновным, так и по слабоосновным аминогруппам, в результате чего суммарная обменная емкость алкилированного волокна по аминогруппам уменьшается. Величина набухания ФИБАН А-13 остается близкой к величине набухания слабоосновного анионита, что можно объяснить как большей гидрофильностью входящего в полимер алкильного остатка, так и невозможностью сшивания нескольких аминогрупп алкилирующим агентом, имеющим только одну функциональную группу, способную реагировать с аминогруппами.

Таким образом, для получения анионитов с высоким содержанием сильноосновных групп мольные соотношения ЭПХГ (ЭТХГ) : NR₁R₂ были выбраны равными 2,0–3,0 при использовании ЭПХГ и 1,0–1,5 – при использовании ЭТХГ.

Для подбора оптимальных условий получения сильноосновных анионитов ФИБАН А-12 и ФИБАН А-13 проведены исследования влияния продолжительности и температуры реакции на физико-химические свойства анионитов. Полученные результаты приведены в табл. 3–5.

Т а б л и ц а 3. Физико-химические свойства сильноосновных волокнистых анионитов ФИБАН А-12 и А-13 в зависимости от времени реакции

Table 3. Physicochemical properties of FIBAN A-12 and A-13 strongly basic fiber anion exchangers as a function of reaction time

Марка анионита ФИБАН	Время реакции, ч	Набухание, г H ₂ O/г	ОЕ по аминогруппам, мг-экв/г		
			слабые	сильные	общая
А-12	2,5	1,10	3,91	1,78	5,69
	4	1,05	2,88	2,32	5,20
	5	0,91	3,12	2,36	5,48
	6	0,84	2,87	2,21	5,08
	7	0,72	2,46	2,25	4,71
А-13	2,5	1,59	4,34	0,54	4,88
	4	1,60	4,17	1,01	5,18
	5	1,66	4,05	1,21	5,26
	6	1,68	4,07	1,15	5,22
	7	1,70	4,12	1,12	5,24

У с л о в и я с и н т е з а: мольное соотношение ЭПХГ : NR₁R₂ = 2,5, мольное соотношение ЭТХГ : NR₁R₂ = 1, концентрация ЭПХГ и ЭТХГ – 10,0 %, температура – 20 °С.

Показано (табл. 3), что с повышением времени реакции количество сильноосновных аминогрупп у анионитов ФИБАН А-12 и А-13 увеличивается и проходит через максимум при 5 ч, т. е. оптимальное время проведения реакции при 20 °С 5 ч. Причем при получении ФИБАН А-12 с увеличением продолжительности реакции снижается величина набухания, что может свидетельствовать об алкилировании вторичной аминогруппы с образованием более гидрофобной

третичной аминогруппы. Одновременно увеличивается масса волокна и тем самым снижается обменная емкость, рассчитанная на единицу массы. В то же время обращает на себя внимание, что обменная емкость по сильноосновным группам сохраняется практически на одном уровне в отличие от обменной емкости по слабоосновным группам. Эти данные позволяют предположить, что с увеличением времени алкилирования ЭПХГ продолжается как алкилирование третичных аминогрупп с образованием четвертичных, так и алкилирование вторичных аминогрупп с образованием третичных. Вероятно, при 20 °С роль процесса сшивания за счет реакции аминогрупп по двум функциональным группам незначительна.

Результаты исследования влияния температуры алкилирования на характеристики конечных волокон приведены табл. 4. Показано, что при получении ФИБАН А-12 с увеличением температуры количество сильноосновных аминогрупп растет не более чем на 7 %. При этом во всем исследуемом интервале температур емкость по сильноосновным группам превышает 2,3 мг-экв/г, что выше содержания сильноосновных групп в сильноосновном волокне ФИБАН А-6.

Таблица 4. Физико-химические свойства сильноосновных волокнистых анионитов ФИБАН А-12 и А-13 в зависимости от температуры реакции

Table 4. Physicochemical properties of FIBAN A-12 and A-13 strongly basic fiber anion exchangers as a function of reaction temperature

Марка анионита ФИБАН	Температура реакции, °С	Набухание, г Н ₂ О/г	ОЕ по аминогруппам, мг-экв/г		
			слабые	сильные	общая
А-12	20	0,91	3,12	2,36	5,48
	40	0,98	3,07	2,35	5,42
	60	1,09	2,71	2,38	5,09
	80	1,05	2,10	2,53	4,63
	100	1,10	2,05	2,49	4,54
А-13	20	1,66	4,05	1,21	5,26
	60	1,52	4,10	1,25	5,35
	80	1,50	3,89	1,46	5,35
	100	1,42	3,54	1,52	5,06

Условия синтеза: мольное соотношение ЭПХГ : NR₁R₂ = 2,5; мольное соотношение ЭТХГ : NR₁R₂ = 1,0, концентрация ЭПХГ и ЭТХГ – 10,0 %; время реакции – 5 ч.

При получении ФИБАН А-13 с увеличением температуры наблюдается рост содержания сильноосновных аминогрупп на 25 % (табл. 4). Вместе с тем максимальная обменная емкость для ФИБАН А-13 по сильноосновным аминогруппам в 1,6 раза меньше, чем для ФИБАН А-12. Этот факт говорит о том, что образующиеся при алкилировании ЭТХГ группы достаточно термостабильны в отличие от их химической стойкости в избытке алкилирующего агента (табл. 2). На основании результатов исследований для получения волокон с максимальной обменной емкостью по сильноосновным группам оптимальная температура реакции алкилирования при использовании ЭПХГ составляет 20 °С, а при использовании ЭТХГ – 80–100 °С.

Исследования зависимости физико-химических свойств сильноосновных анионитов от концентрации алкилирующих агентов проводили в диапазоне концентраций от 5,0 до 12,5 %. Результаты представлены в табл. 5. Полученные данные свидетельствуют, что с ростом концентрации ЭПХГ количество сильных аминогрупп проходит через максимум при 7,5–10,0 % (оптимальная концентрация), а для ЭТХГ можно ограничиться концентрацией 5 %.

Были исследованы физико-химические (табл. 6) и механические (табл. 7) характеристики сильноосновных анионитов ФИБАН А-12 и А-13, полученных на основе образцов 1 и 2 исходного слабоосновного анионита (табл. 1), синтезированных из водного и этиленгликолевого раствора.

Показано (табл. 7), что сильноосновные аниониты ФИБАН А-12 и ФИБАН А-13 имеют удовлетворительные механические характеристики и могут быть переработаны в нетканые материа-

Таблица 5. Физико-химические свойства сильноосновных волокнистых анионитов ФИБАН А-12 и А-13 в зависимости от концентрации алкилирующих реагентов
 Table 5. Physicochemical properties of FIBAN A-12 and A-13 strongly basic fiber anion exchangers as a function of alkylating reagent concentration

Марка анионита ФИБАН	Концентрация ЭПХГ, %	Набухание, г H ₂ O/г	ОЕ по аминок группам, мг-экв/г		
			слабые	сильные	общая
А-12	5,0	0,83	2,52	2,09	4,61
	7,5	0,89	2,89	2,23	5,12
	10,0	0,91	3,12	2,36	5,48
	12,5	0,89	2,93	2,02	4,95
А-13	5,0	1,60	4,07	1,15	5,22
	10,0	1,66	4,05	1,21	5,26
	12,5	1,65	4,02	1,19	5,21

Условия синтеза: мольное соотношение ЭПХГ : NR₁R₂ = 2,5, мольное соотношение ЭТХГ : NR₁R₂ = 1, температура реакции – 20 °С, время реакции – 5 ч.

Таблица 6. Физико-химические свойства сильноосновных анионитов ФИБАН, использованных для определения механических характеристик

Table 6. Physicochemical properties of FIBAN strongly basic anion exchangers used for determination of mechanical properties

Тип ионита	Слабоосновное волокно	ОЕ по аминок группам, мг-экв/г			W, г H ₂ O/г ионита
		сильным	слабым	Σ	
А-12	А-11 (H ₂ O)	1,92	1,94	3,86	0,58
	А-11 (ЭГ)	1,85	2,39	4,24	1,57
А-13	А-11 (H ₂ O)	0,99	3,83	4,82	1,11
	А-11 (ЭГ)	0,65	4,21	4,86	2,11
А-6	А-5 (H ₂ O)	2,0	0,8	2,8	1,2

Таблица 7. Механические характеристики сильноосновных анионообменных волокон ФИБАН

Table 7. Mechanical characteristics of FIBAN strongly basic anion exchange fibers

Тип ионита	d, мкм	F, сН	σ, МПа/мм ²	ε, %
А-12 из А-11 (H ₂ O)	45,6 ± 4,2	3,1 ± 0,5	18,0 ± 4,7	5,7 ± 0,9
А-12 из А-11 (ЭГ)	46,3 ± 6,4	6,5 ± 1,2	37,7 ± 5,6	21,0 ± 2,3
А-13 из А-11 (H ₂ O)	44,7 ± 5,6	2,2 ± 0,4	17,4 ± 3,5	26,9 ± 2,8
А-13 из А-11 (ЭГ)	41,7 ± 6,1	5,9 ± 0,7	31,7 ± 9,1	29,8 ± 10,6
А-6 из А-5 (H ₂ O)	32,3 ± 1,9	5,5 ± 0,7	70,0 ± 10,0	30 ± 4,4

Примечание. d – диаметр моноволокна, F – разрывное усилие, σ – прочность, ε – удлинение при разрыве.

лы и аппаратную пряжу с целью использования для очистки воздуха и воды. Для устранения невысокой эластичности сильноосновного анионита ФИБАН А-12, полученного на основе слабоосновного анионита, синтезированного в водном растворе, требуется оптимизация параметров синтеза исходного волокна и условий его алкилирования.

Заключение. Таким образом, проведены исследования влияния условий получения на физико-химические свойства новых сильноосновных анионитов. Установлено, что условия получения нового волокнистого сильноосновного анионита ФИБАН А-12 с максимальной обменной емкостью по сильноосновным группам следующие: время реакции 5 ч, мольное соотношение ЭПХГ : NR₁R₂ (слабоосновного анионита) = 2,0–3,0, температура процесса 20 °С, концентрация ЭПХГ 7,5–10 %. Оптимальные условия получения волокнистого анионита ФИБАН А-13: время реакции 5 ч, мольное соотношение ЭТХГ : NR₁R₂ (слабоосновного анионита) = 1,0–1,5, температура процесса 80–100 °С, концентрация ЭТХГ 5 %. Показаны удовлетворительные механические свойства новых сильноосновных волокон, что позволит переработать их в различные текстильные формы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вулих, А. И. Новая сфера применения ионитов – очистка газов / А. И. Вулих, А. А. Аловяйников, Г. А. Никандров // *Ионный обмен: сб. ст. / Акад. наук СССР, Ин-т геохимии и аналит. химии им. В. И. Вернадского: М. М. Сенявин (отв. ред.)*. – М.: Наука, 1981. – С. 214–229.
2. Soldatov, V. S. Ion exchangers for air purification / V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich // *Ion exchange and solvent extraction, A series of advances*. – USA: CRC Press Taylor and Francis Group. – 2011. – Vol. 20. – P. 45–117. <https://doi.org/10.1201/b10813-3>
3. Рябчиков, Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 328 с.
4. Зверев, М. П. Хемосорбционные волокна / М. П. Зверев. – М.: Химия, 1981. – 192 с.
5. Зверев, М. П. Волокнистые хемосорбенты / М. П. Зверев, З. З. Абдулхакова. – М.: Химия, 2001. – 173 с.
6. Волокна с особыми свойствами / под ред. Л. А. Вольфа. – М.: Химия, 1980. – 240 с.
7. Мартинович, В. И. Состояние и перспективы применения волокон ФИБАН для очистки воздуха и воды / В. И. Мартинович // *Химия и технология новых веществ и материалов: сб. науч. тр. / под ред. А. В. Бильдюкевича*. – Минск: Технопринт, 2005. – С. 119–134.
8. Зверев, М. П. Хемосорбционные волокна – материалы для защиты среды обитания от вредных выбросов / М. П. Зверев // *Экология и промышленность России*. – 1997. – № 4. – С. 35–38.
9. Новые возможности использования волокнистых ионитов для очистки воды / Г. В. Медяк [и др.] // *Химия и технология новых веществ и материалов: сб. науч. тр.; под ред. А. В. Бильдюкевича*. – Минск: Беларуская навука, 2014. – С. 499–532.
10. Волокнистые иониты ФИБАН – получение, модификация и применение / А. П. Поликарпов [и др.] // *ЖРХО им. Д. И. Менделеева*. – 2015. – Т. 59. – № 3. – С. 102–111.
11. Новые волокнистые аниониты на основе полиакрилонитрильных волокон / С. Д. Филиппович [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2014. – № 2. – С. 81–85.
12. Филиппович, С. Д. Синтез и свойства нового волокнистого анионита на основе нитрона и N,N-диметилдипропилен триамина / С. Д. Филиппович, А. А. Шункевич, В. И. Грачек // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2015. – № 2. – С. 82–86.
13. Полянский, Н. Г. Методы исследования ионитов / Н. Г. Полянский, Г. В. Горбунов, Н. П. Полянская. – М.: Химия, 1976. – 208 с.
14. Новые волокнистые полиакрилонитрильные иониты ФИБАН с сильноосновными группами / З. И. Акулич [и др.] // *Научно-технические проблемы развития производства химических волокон в Беларуси: материалы 2-й Белорус. науч.-практ. конф. – Могилев, 2002*. – С. 260–271.
15. Acid-base properties of ion exchangers. III. Anion exchangers on the basis of polyacrylonitrile fiber / A. A. Shunkevich [et al.] // *React. and Funct. Polym.* – 2005. – Vol. 63, N 1. – P. 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2005.02.002>

References

1. Vulikh A. I., Alovaiynikov A. A., Nikandrov G. A. A new field of application of ion-exchangers is gas purification. *Ionnyi obmen. Sbornik statei* [Ion exchange. Digest of articles]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 214–229 (in Russian).
2. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. Ion exchangers for air purification. *Ion exchange and solvent extraction, A series of advances*. USA, CRC Press Taylor and Francis Group Publ., 2011, vol. 20, pp. 45–117. <https://doi.org/10.1201/b10813-3>
3. Ryabchikov B. E. *Modern methods of water treatment for industrial and domestic use*. Moscow, DeLi print Publ., 2004. 328 p. (in Russian).
4. Zverev M. P. *Chemisorption fibers*. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 192 p. (in Russian).
5. Zverev M. P., Abdulhakova Z. Z. *Fibrous chemisorbents*. Moscow, Khimiya Publ., 2001, 173 p. (in Russian).
6. Volf L. A. (ed.) *Fibers with special properties*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 240 p. (in Russian).
7. Martinovich V. I. State and prospects of the use of FIBAN fibers for air and water purification. *Himiya i tehnologiya novyh veshstv i materialov. Sb. nauchn. trudov* [Chemistry and technology of new substances and materials. Collection of scientific papers]. Minsk, Tehnoprint Publ., 2005, pp. 119–134 (in Russian).
8. Zverev M. P. Chemisorption fibers – materials for protecting the environment from harmful emissions. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and industry of Russia*, 1997, no. 4, pp. 35–38 (in Russian).
9. Medyak G. V., Sokolova V. I., Solovov S. A., Belotserkovskaya T. N., Shunkevich A. A., Bilydukevich A. V., Polikarpov A. P. New possibilities of using fibrous ion exchangers for water purification. *Himiya i tehnologiya novyh veshstv i materialov. Sb. nauchn. trudov* [Chemistry and technology of new substances and materials. Collection of scientific papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, pp. 499–532 (in Russian).
10. Polikarpov A. P., Shunkevich A. A., Grachek V. I., Medyak G. V. FIBAN fibrous ion exchangers: Synthesis, modification, application. *Russian Journal of General Chemistry*, 2017, vol. 87, no. 6, pp. 1418–1427. <https://doi.org/10.1134/s1070363217060457>
11. Filippovich S. D., Akulich Z. I., Shunkevich A. A., Grachek V. I. New fibrous anion exchangers based on acrylonitrile fibres. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2014, no. 2, pp. 81–85 (in Russian).
12. Filippovich S. D., Shunkevich A. A., Grachek V. I. Synthesis and properties of a new fibrous anionite based on nitron and N,N-dimethyldipropylentriamine. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2015, no. 2, pp. 82–86 (in Russian).

13. Polyanskij N. G., Gorbunov G. V., Polyanskaya N. P. *Research methods of ion-exchangers*. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 208 p. (in Russian).

14. Akulich Z. I., Sokolova V. I., Medyak G.V., Shunkevich A. A., Soldatov V.S. New fibrous Polyacrylonitrile FIBAN ion-exchanges with strongly basic groups. *Nauchno-tehnicheskie problemy razvitiya proizvodstva himicheskikh volokon v Belarusi. Materialy 2-i Belorusskoi nauchno-prakticheskoi konferencii* [Scientific and technical problems of chemical fiber production development in Belarus. Materials of 2nd scientific practical conference]. Mogilev, 2002, pp. 260–271 (in Russian).

15. Shunkevich A. A., Akulich Z. I., Mediak G.V., Soldatov V. S. Acid-base properties of ion exchangers. III. Anion exchangers on the basis of polyacrylonitrile fiber. *Reactive and Functional Polymers*, 2005, vol. 63, no. 1, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2005.02.002>

Информация об авторах

Шункевич Александр Акимович – 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

Поликарпов Александр Петрович – канд. хим. наук, зав. лаб. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fiban@ifoch.bas-net.by

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

Филиппович Сергей Дмитриевич – вед. специалист, ИООО «ЭПАМ Системз» (пр. Независимости, 186, 220056, Минск, Республика Беларусь)

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

Information about the authors

Shunkevich Aleksandr A. – 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

Polikarpov Aleksandr P. – 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). E-mail: fiban@ifoch.bas-net.by

Medyak Galina V. – 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: medyakg@ifoch.bas-net.by

Filippovich Sergey D. – Lead Content Specialist, EPAM Systems (186, Nezavisimosti ave., 220056, Minsk, Republic of Belarus)

Akulich Zinaida I. – Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov str., 220072, Minsk, Republic of Belarus)