

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 541.183.12

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-101-108>

Поступила в редакцию 25.11.2020

Received 25.11.2020

Г. В. Медяк, А. А. Шункевич, А. П. Поликарпов, В. В. Пансевич, З. И. Акулич

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

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОРБЦИЮ ДИОКСИДА СЕРЫ ВОЛОКНИСТЫМИ АНИОНИТАМИ ФИБАН

Аннотация. Проведено сравнительное исследование волокнистых анионитов ФИБАН с аминогруппами различной структуры и основности в отношении сорбции диоксида серы из воздуха. Показано, что основными факторами, влияющими на сорбцию диоксида серы, являются влагоемкость анионитов в условиях заданной влажности газовоздушного потока, основность и природа аминогрупп, а также наличие катионообменных групп в составе анионита. Аниониты с сильноосновными группами поглощают диоксид серы при низких значениях относительной влажности воздуха (30 %), но обладают невысокой динамической сорбционной емкостью (до 1,3 мг-экв/г). Аниониты, содержащие первичные и вторичные аминогруппы, могут быть использованы для сорбции диоксида серы при повышенных значениях относительной влажности воздуха (более 54 %) в том случае, если их катионообменная емкость в несколько раз меньше анионообменной. Наиболее эффективными сорбентами диоксида серы являются аниониты с третичными аминогруппами, которые обладают высокой обменной емкостью (более 5 мг-экв/г) и дополнительно содержат вторичные аминогруппы.

Ключевые слова: волокнистые аниониты, сорбция, диоксид серы, очистка воздуха

Для цитирования: Оценка факторов, влияющих на сорбцию диоксида серы волокнистыми анионитами ФИБАН / Г. В. Медяк [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 101–108. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-101-108>

G. V. Medyak, A. A. Shunkevich, A. P. Polikarpov, V. V. Pansevich, Z. I. Akulich

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

EVALUATION OF FACTORS AFFECTING THE SORPTION OF SULFUR DIOXIDE BY FIBAN FIBROUS ANION EXCHANGERS

Abstract. The sorption of sulfur dioxide from the air by the fibrous anion exchangers containing amino groups of different structure and basicity has been comparatively investigated. The most effective sorbents of sulfur dioxide are the anion exchangers with ternary amino groups, which have a high exchange capacity (more than 5 meq/g) and additionally contain secondary amino groups. The anion exchangers with high-base amino groups absorb sulfur dioxide at low relative humidity (30 %) but have low dynamic sorption capacity (up to 1.3 meq/g). The anion exchangers with primary and secondary amino groups absorb sulfur dioxide at high relative humidity (more than 54 %) if their cation exchange capacity is several times less than the anion exchange capacity.

Keywords: fibrous ion exchangers, sorption, sulfur dioxide, air purification

For citation: G. V. Medyak, A. A. Shunkevich, A. P. Polikarpov, V. V. Pansevich, Z. I. Akulich. Evaluation of factors affecting the sorption of sulfur dioxide by FIBAN fibrous anion exchangers. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 101–108 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-101-108>

Введение. Диоксид серы является одним из основных и наиболее вредных компонентов загрязнения атмосферного воздуха. Ежегодный выброс диоксида серы в атмосферу в мире по разным оценкам достигает 100–150 млн т. Главные источники – это электростанции, нефтеперерабатывающие и металлургические заводы. На их долю приходится две трети выбросов диоксида серы в мире. В Республике Беларусь предельно допустимая концентрация (ПДК) диоксида серы в атмосферном воздухе населенных мест составляет 500 (максимальная разовая), 200 (среднесуточная) и 50 (среднегодовая) мкг/м³ [1], а в воздухе рабочей зоны – 10 мкг/м³ (максимальная разовая) [2].

Одним из эффективных методов очистки воздуха от диоксида серы является сорбционный метод с использованием волокнистых анионообменных фильтров [3–6]. Так, для санитарной очистки в системах вентиляции и кондиционирования от газообразных и паровых загрязнений кислой природы используют фильтры с анионообменными материалами ФИБАН АК-22, ПАНИОН

и МИОН. Эти фильтры рекомендованы в качестве последней ступени очистки после освобождения воздуха от пыли и аэрозолей при начальных концентрациях газообразных загрязнителей не более 5–7 ПДК. Еще более жесткие требования к содержанию диоксида серы предъявляют предприятия электронной, фармацевтической и специализированных цехов пищевой промышленности. Для глубокой очистки воздуха «чистых комнат» на этих производствах используют нетканый материал ФИБАН А-5. Этот анионит работоспособен при относительно низких влажностях воздуха (40–45 %), что является необходимым условием использования материалов по данному назначению. К настоящему времени разработаны новые волокнистые аниониты с повышенной сорбционной емкостью, способные поглощать диоксид серы при относительной влажности воздуха 30 % [7–10].

Цель настоящей работы состояла в экспериментальной оценке факторов, оказывающих влияние на сорбционную емкость и работоспособность волокнистых материалов ФИБАН по диоксиду серы при различных значениях влажности воздуха.

Экспериментальная часть. Объекты исследования. В качестве объектов исследования использовали образцы ионитов ФИБАН с аминогруппами различной основности и строения: слабоосновные аниониты АК-22, А-5 и А-11, сильноосновные аниониты А-6 и А-12, полученные алкилированием анионитов А-5 и А-11, а также полиамфолит АК-22В. Все аниониты были синтезированы в Институте физико-органической химии НАН Беларуси путем аминирования полиакрилонитрильного (ПАН) волокна Нитрон С (сополимер 92,5 % акрилонитрила, 6 % метилакрилата и 1,5 % итаконовой кислоты) различными аминирующими агентами (табл. 1). В качестве алкилирующего агента использовали эпихлоргидрин (ЭПХГ). Причем во всех слабоосновных анионитах могло содержаться небольшое количество карбоксильных групп вследствие гидролиза нитрильных групп ПАН волокна. Полиамфолит АК-22В получали аминированием ПАН волокна с помощью диэтилентриамин (ДЭТА) в присутствии карбоната натрия в качестве гидролизующего агента [11]. Исследовали как сорбцию диоксида серы, так и паров воды на ионитах с функциональными группами разной природы, поскольку равновесные и кинетические характеристики ионообменных сорбентов зависят от их влагосодержания при заданной влажности газозоудушного потока [12, 13].

Таблица 1. Физико-химические характеристики анионитов ФИБАН
Table 1. Physicochemical characteristics of FIBAN anion exchangers

Тип анионита	Аминирующий агент	Функциональные группы	ОЕ, мг-экв/г		W , г H ₂ O/г ионита
			по аминогруппам	по COOH	
АК-22 нетканый	ДЭТА	=NH, –NH ₂ –COOH	4,23	1,10	0,66
АК-22В нетканый	ДЭТА	=NH, –NH ₂ –COOH	1,76	1,81	0,60
А-5 нетканый	ДМАПА	≡N, =NH –COOH	3,89–4,20	0,50	1,39
А-6* нетканый	ДМАПА	≡N ⁺ –, ≡N –COOH	3,15 сильные – 2,14 слабые – 1,01	0,38	1,04
А-11 штапель	ДМДПТА	≡N, =NH	5,11	0	0,87
А-12** штапель	ДМДПТА	≡N ⁺ –, ≡N –COOH	3,89 сильные – 2,03 слабые – 1,86	0,05	0,57

Примечание. ОЕ – обменная емкость; W – набухание; ДЭТА – диэтилентриамин NH₂CH₂CH₂NHCH₂CH₂NH₂; ДМАПА – N,N-диметиламинопропиламин NH₂(CH₂)₃N(CH₃)₂; ДМДПТА – N,N-диметилдипропилентриамин NH₂(CH₂)₃NH(CH₂)₃N(CH₃)₂.

*Получен алкилированием ЭПХГ (CH₂OCHCH₂Cl) анионита ФИБАН А-5.

**Получен алкилированием ЭПХГ анионита ФИБАН А-11.

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. При отдельном определении слабоосновных и четвертичных

групп в сильноосновных анионитах отмывку образцов проводили метиловым спиртом в аппарате Сокслета до отсутствия в спирте ионов хлора. Для изучения сорбционных свойств образцы переводили в гидрокарбонатную форму обработкой 0,5 н. раствором NaHCO_3 с последующей отмывкой от избытка гидрокарбоната 0,001 н. раствором NaHCO_3 до $\text{pH} \sim 8$. Далее образцы сушили на воздухе при комнатной температуре. Влажность воздушно-сухих образцов определяли гравиметрически по потере массы после высушивания до постоянной массы при температуре $100 \pm 2^\circ\text{C}$.

Обменную емкость определяли титриметрически по методике, разработанной для полиамфолитов. Одну навеску образца $\sim 0,25$ г помещали в 20 мл 0,1 н. HCl , выдерживали до наступления равновесия и титровали аликвоту раствором щелочи в присутствии смешанного кислотно-основного индикатора (pH перехода 5,1). Получали содержание аминогрупп в основной форме (А). Другую навеску образца $\sim 0,25$ г помещали в 20 мл 0,1 н. NaOH , выдерживали до наступления равновесия и титровали одну аликвоту раствором соляной кислоты со смешанным индикатором, а другую – 0,03 н. $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ с дифенилкарбазоном в качестве индикатора. Первое титрование соответствовало суммарному содержанию карбоксильных групп и аминогрупп в хлоридной форме (Г), а второе – содержанию аминогрупп в хлоридной форме (Б). Тогда общее содержание анионообменных групп в исследованном образце равно $A+B$, а содержание катионообменных групп равно $\Gamma-B$. Раздельное определение слабоосновных и четвертичных групп в сильноосновных анионитах проводили по методу Штамберга [14].

Величину набухания рассчитывали по разности масс сухого и набухшего образца, предварительно отцентрифугированного в течение 15 мин при 4000 об/мин (1431 g).

Сорбцию паров воды определяли изопиестическим методом. Изопиестические кривые получали в статических условиях путем выдерживания образцов ионитов над растворами солей, создающими над их поверхностью определенные значения относительной влажности, в течение времени наступления межфазного равновесия (до 28 сут) [12].

Сорбцию диоксида серы осуществляли в динамических условиях при скорости газовой воздушного потока $v = 0,065$ м/с, соответствующей скорости прохождения воздуха через системы газоочистки, начальной концентрации диоксида серы $C_0 = 28\text{--}37$ мг/м³, в 3–4 раза превышающей величину ПДК, и температуре $18\text{--}20^\circ\text{C}$. Сорбенты испытывали в виде штапеля и нетканых материалов, предварительно переведенных в бикарбонатно-основную форму. Суть эксперимента заключалась в пропускании воздуха, увлажненного до заданной величины и с контролируемым содержанием диоксида серы, через сорбционную ячейку с анионитом известной массы. Высота сорбционного слоя составляла $5\text{--}7$ мм. Схема экспериментальной установки и методика испытаний аналогичны описанным в работе [15].

Анализ содержания диоксида серы в воздухе проводили потенциометрическим титрованием серной кислоты, образующейся в результате пропускания газовой воздушного потока через поглотительную склянку с $\sim 1,3$ %-ным водным раствором перекиси водорода, до точки эквивалентности.

Результаты и их обсуждение. Физико-химические характеристики объектов исследования представлены в табл. 1. Исследованные аниониты различаются не только основностью функциональных групп, но и их природой, а также набуханием и соотношением количества анионо- и катионообменных групп.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что наименьшей способностью поглощать воду из окружающего воздуха обладают анионит ФИБАН АК-22 и полиамфолит ФИБАН АК-22В, содержащие в своем составе первичные и вторичные аминогруппы. Для анионитов, в которых имеются третичные (ФИБАН А-5 и А-11) или третичные и до 68 % четвертичных аминогрупп (ФИБАН А-6 и А-12), абсолютные величины поглощения воды очень близки во всем диапазоне значений относительной влажности воздуха. Если же рассчитать эквивалентный коэффициент влагоемкости K^3 , который определяется как число молекул воды, приходящееся на одну функциональную группу, включая как анионообменные, так и катионообменные группы в анионите, то различия между ионитами становятся очевидными (табл. 2). Чем выше основность анионита, тем больше его влагоемкость, выраженная в молях воды на эквивалент функциональной группы. Исключение составляет анионит ФИБАН АК-22В, для которого величина коэффициента

влагоемкости находится на уровне величин K_3 для анионитов с третичными аминогруппами, что может быть следствием концентрации молекул воды вокруг ионизованных форм карбоксильных и аминогрупп ионита, образующих внутреннюю соль. Тогда на свободные аминогруппы приходится меньшее количество молекул воды, что следует из эквивалентного коэффициента влагоемкости.

Таблица 2. Поглощение паров воды анионитами ФИБАН

Table 2. Water absorption by FIBAN anion exchangers

Тип анионита	$\varphi = 20 \%$		$\varphi = 43 \%$		$\varphi = 64 \%$	
	$Q, \%$	K^3 , моль/экв	$Q, \%$	K^3 , моль/экв	$Q, \%$	K^3 , моль/экв
АК-22 нетканый	11,2	1,16	17,3	1,81	23,8	2,48
АК-22В нетканый	10,1	1,57	15,0	2,33	20,4	3,19
А-5 нетканый	13,6	1,66	20,0	2,44	33,2	3,81
А-6 нетканый	13,3	2,09	20,0	3,13	29,7*	4,67*
А-11 штапель	13,1	1,42	19,0	2,06	30,7	3,33
А-12 штапель	13,7	1,93	20,9	2,95	28,6	4,03

Примечание. W – набухание; φ – относительная влажность газовоздушного потока; Q – поглощение паров воды, %. *Поглощение воды при $\varphi = 58 \%$.

В результате проведения сорбционных исследований установлено, что нетканый материал, полученный на основе слабоосновного анионита ФИБАН АК-22, очищает воздух от диоксида серы, начиная с $\varphi = 54 \%$ (табл. 3), когда вблизи каждой функциональной группы ионита находится две и более молекул воды [12]. В то же время нетканый материал из анионита ФИБАН АК-22В не обладает заметной сорбционной активностью даже при такой влажности газового потока, несмотря на высокие значения числа молекул воды, приходящихся на одну функциональную группу ионита. Это может быть следствием образования внутренней соли между близко расположенными карбоксильными и аминогруппами. В условиях динамического режима сорбции, когда время контакта волокнистого ионита с газовым потоком составляет доли секунды ($\sim 0,1$ с), процесс распада внутренней соли с замещением карбоксильного иона на бисульфит-ион может не реализоваться.

Материалы ФИБАН А-5 и А-11 с третичными аминогруппами работоспособны (табл. 3) при $\varphi = 36$ и даже 30% . Высокая эффективность сорбции диоксида серы анионитами с третичными группами объясняется взаимодействием этих групп с сильной серной кислотой, а не с сернистой, в результате каталитического окисления гидросульфит-иона в фазе оводненного ионита до сульфат-иона [16]. При этом время до проскока ПДК у ФИБАН А-11 в несколько раз выше, чем у ФИБАН А-5, что не может быть объяснено только увеличением обменной емкости ионита на $25\text{--}30 \%$, а, скорее всего, связано с возможностью экранирования части аминогрупп содержащихся в ФИБАН А-5 карбоксильными группами, а также различной природой аминогрупп – производных диметилдипропилентриамин или диметиламинопропиламина, в результате чего в составе функциональных групп анионита ФИБАН А-11 наряду с третичными появляются и вторичные аминогруппы.

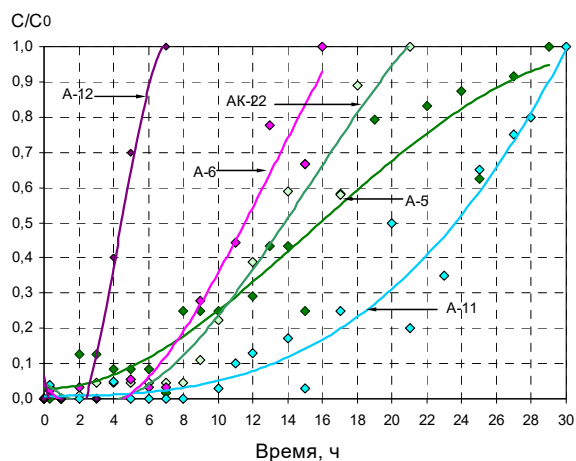
Аниониты ФИБАН А-6 и А-12, содержащие в своем составе наряду с третичными и четвертичные аминогруппы, способны поглощать диоксид серы в условиях еще более низкой влажности воздуха (табл. 3, рис. 1, 2). Особенно выражена эта способность для сильноосновного анионита ФИБАН А-6, у которого две трети аминогрупп составляют четвертичные, тогда как для анионита ФИБАН А-12 содержание третичных и четвертичных групп примерно одинаково. В результате при низкой относительной влажности воздуха ($\leq 40 \%$) сильноосновный анионит ФИБАН А-6 превосходит по сорбционной емкости и времени удерживания диоксида серы до проскока ПДК слабоосновной анионит ФИБАН А-5, из которого он был получен. В то же время анионит ФИБАН А-12 уступает по сорбционным характеристикам аниониту ФИБАН А-11 во всем исследованном диапазоне относительной влажности газовоздушного потока φ .

Т а б л и ц а 3. Сорбционные характеристики анионитов ФИБАН

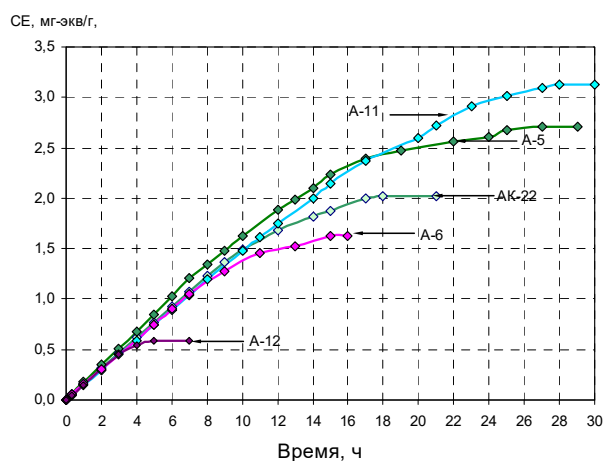
T a b l e 3. Sorption characteristics of FIBAN anion exchangers

Тип анионита	φ, %	СЕ, мг-экв/г			$t_{\text{ПДК}}, \text{ч}$
		до $C/C_0 = 0,1$	до ПДК	до насыщения	
АК-22 нетканый	37	0,02	0,07	0,13	0,2
	45	0,05	0,13	0,48	1,2
	54	1,23	1,61	2,02	11,0
АК-22В нетканый	55	0,13	0,16	0,23	1,5
А-5 нетканый	36	0,75	1,00	1,73	5,0
	40	1,11	1,25	1,37	8,1
	45	1,98	2,10	2,21	15,8
А-6 нетканый	30	1,05	1,32	1,63	9,5
	37	1,42	1,74	1,87	12,0
	45	1,47	1,55	1,62	10,2
А-11 штапель	30	0,97	1,23	1,40	9,0
	40	1,88	2,60	3,12	20,0
	45	2,66	3,33	3,81	23,0
А-12 штапель	30	0,45	0,50	0,58	3,6
	40	0,53	0,98	1,33	8,0
	45	0,91	1,43	1,82	10,0

П р и м е ч а н и е. СЕ – сорбционная емкость; $t_{\text{ПДК}}$ – время до проскока ПДК.



a



b

Рис. 1. Кривые проскока (a) и сорбции (b) диоксида серы на волокнистых анионитах ФИБАН при относительной влажности воздуха, обеспечивающей достижение эффективного коэффициента влагоемкости $K^3 = 2$: АК-22 – 54 %, А-5 – 36, А-6 – 30, А-11 – 40 и А-12 – 30 %

Условия эксперимента: температура – 18–20 °С; скорость фильтрации – 0,065 м/с; исходная концентрация SO_2 – 28–37 мг/м³; толщина фильтрационного слоя – 5–7 мм

Fig. 1. Breakthrough (a) and sorption (b) curves of sulfur dioxide on the FIBAN fibrous anion exchangers at relative humidity of air ensuring the effective coefficient of moisture capacity $K^3 = 2$: АК-22 – 54 %, А-5 – 36, А-6 – 30, А-11 – 40 and А-12 – 30 %. Conditions of the experiment: temperature – 18–20 °С; filtration rate – 0.065 m/s; initial SO_2 concentration – 28–37 mg/m³; filtration layer thickness – 5–7 mm

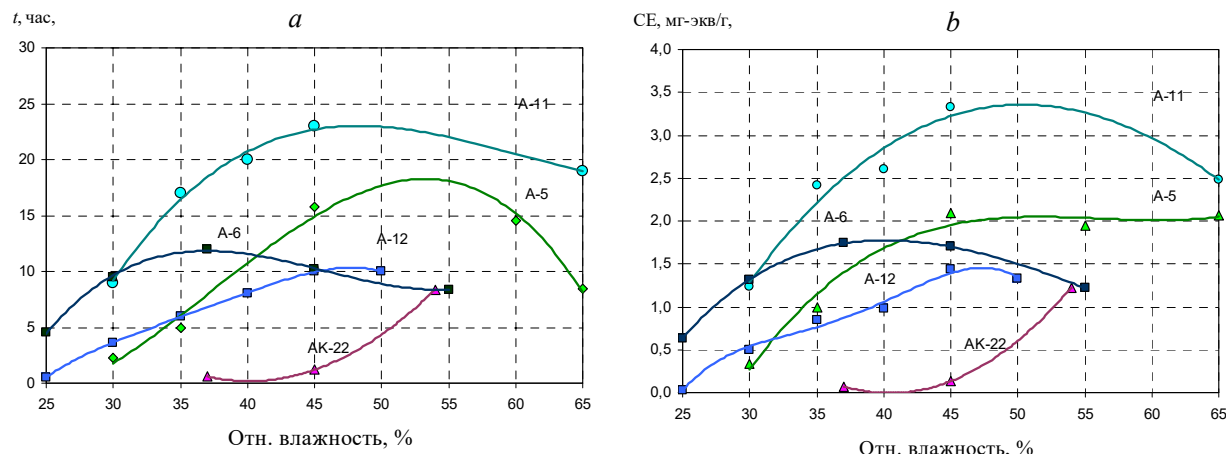


Рис. 2. Время защиты от диоксида серы (а) и сорбционная емкость анионитов ФИБАН (b) до проскока $C/C_0 = 0,3$ (ПДК по SO_2) при различной относительной влажности воздуха

Fig. 2. Protective time from sulfur dioxide (a) and sorption capacity of FIBAN anion exchangers (b) to the $C/C_0 = 0.3$ (MPC for SO_2) under different relative humidity of air

Закключение. Показано, что на сорбционную емкость и эффективность поглощения диоксида серы из воздуха оказывают влияние несколько факторов разнонаправленного действия. С увеличением содержания четвертичных аминогрупп, т.е. с ростом основности функциональных групп аниониты, содержащие третичные аминогруппы, способны работать в более низком диапазоне относительной влажности газового потока. В то же время невысокая динамическая емкость сильноосновных анионитов ограничивает возможность их применения в фильтрах глубокой очистки воздуха, где периодическая регенерация сорбентов во время работы не предусмотрена. Поглощение диоксида серы из воздуха осуществляется при наличии двух и более молекул воды вблизи аминогруппы анионита. Причем для каждого ионита существует оптимальный интервал относительной влажности воздуха, внутри которого его динамическая активность по диоксиду серы максимальна. С ростом содержания катионообменных групп в ионите эффективность сорбции диоксида серы уменьшается, и для полиамфолитов сорбционная емкость может не реализоваться вовсе. Сорбционная емкость анионитов с третичными группами увеличивается как с повышением их общей анионообменной емкости, так и с изменением природы функциональных групп, в частности, с наличием дополнительных вторичных аминогрупп в их составе. Наиболее эффективными из исследованных сорбентами диоксида серы являются аниониты с третичными аминогруппами ФИБАН А-5 и А-11. Причем специально разработанный для этой цели анионит ФИБАН А-11 [7, 8] отличается высокой сорбционной емкостью и степенью очистки воздуха в широком диапазоне влажности газовой воздушного потока.

Список использованных источников

1. Нормативы предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [Электронный ресурс]: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 8.11.2016 г., № 113. – Режим доступа: <http://minzdrav.gov.by/ru/dlya-spetsialistov/normativno-pravovaya-baza/tekhnicheskie-normativnye-pravovye-akty/teksty-tekhnicheskikh-normativnykh-aktov/atmosfernyy-vozdukh-i-vozdukh-zakrytykh-pomeshcheniy-sanitarnaya-okhrana-vozdukh.php>. – Дата доступа: 19.12.2020.
2. Гигиенический норматив «Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны» [Электронный ресурс]: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь, 11.10.2017 г., № 92. – Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/W21732492p_1510174800.pdf. – Дата доступа 19.12.2020.
3. Вулих, А. И. Новая сфера применения ионитов – очистка газов / А. И. Вулих, А. А. Аловяйников, Г. А. Никандров // Ионный обмен: сб. ст. / Академия наук СССР, Ин-т геохимии и аналит. химии им. В. И. Вернадского; М. М. Сенявин (отв. ред.). – М.: Наука, 1981. – С. 214–229.
4. Чикин, Г. А. Иониты в газосорбционных технологиях / Г. А. Чикин, О. Н. Мягкой // Ионнообменные методы очистки веществ / под ред. Г. А. Чикин, О. Н. Мягкой. – Воронеж: ВГУ, 1984. – С. 326–367.
5. Soldatov, V. S. Application of fibrous ion exchangers in air purification from acidic impurities / V. S. Soldatov, I. S. Elinson, A. A. Shunkevich // Hydrometallurgy'94. – Dordrecht: Springer, 1994. – P. 837–855. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1214_57

6. 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>
7. Филиппович, С. Д. Новые волокнистые аниониты на основе полиакрилонитрильных волокон / С. Д. Филиппович, З. И. Акулич, А. А. Шункевич, В. И. Грачек // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2014. – № 2. – С. 81–85.
8. Способ получения анионообменного волокна: пат. 18091 Респ. Беларусь, МПКС 08 J 5/20, D 01 F 11/06 (2006) / С. Д. Филиппович, В. И. Грачек, З. И. Акулич, А. А. Шункевич. Оpubл.: 30.04.2014.
9. Волокнистые иониты ФИБАН для очистки воздуха от диоксида серы / А. А. Шункевич [и др.] // *Пылегазоочистка-2019: сб. докл. и каталог XII Междунар. конф., Москва, ГК «ИЗМАЙЛОВО», 24–25 сент. 2019 г. / ООО «ИНТЕХЭКО»*. – М., 2019. – С. 62–66.
10. Способ получения анионообменного волокна: пат. 23166 Респ. Беларусь, МПКС 08 J 5/20, D 01 F 11/06 (2006) / В. И. Грачек, А. П. Поликарпов, А. А. Шункевич, З. И. Акулич, В. И. Исакович. Оpubл. 30.10.2020.
11. Способ получения ионообменного полиамфолитного волокна: пат. 12352 Респ. Беларусь, МПКС 08 J 5/20, D 01 F 11/00 (2006) / А. А. Шункевич, З. И. Акулич, В. И. Грачек, С. Е. Радкевич, В. Ж. Ворса, В. И. Исакович. Оpubл. 30.08.2009.
12. Косандрович, Е. Г. Волокнистый аминокарбоксильный сорбент для очистки воздуха от примесей диоксида серы / Е. Г. Косандрович, О. Н. Дорошкевич // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2014. – № 1. – С. 91–94.
13. Каталитический способ получения и сорбционные свойства волокнистого анионита с третичными аминогруппами / Е. Г. Косандрович [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2017. – № 1. – С. 82–88.
14. Полянский, Н. Г. Методы исследования ионитов / Н. Г. Полянский, Г. В. Горбунов, Н. П. Полянская. – М: Химия, 1976. – 208 с.
15. Косандрович, Е. Г. Сорбция аммиака из воздуха волокнистым сульфокатионитом ФИБАН К-1 / Е. Г. Косандрович, В. С. Солдатов // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2004. – № 3. – С. 95–98.
16. Особенности сорбции диоксида серы из воздуха слабоосновными анионитами / Е. Г. Косандрович [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2020. – № 3. – С. 263–270. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-3-263-270>

References

1. *Standards for maximum permissible concentrations of pollutants in the atmospheric air. Resolution of the Ministry of health of the Republic of Belarus*. November 8, 2016, no. 113. Available at: <http://minzdrav.gov.by/ru/dlya-spetsialistov/normativno-pravovaya-baza/tekhnicheskie-normativnye-pravovye-akty/teksty-tekhnicheskikh-normativnykh-aktov/atmosfernnyy-vozdukh-i-vozdukh-zakrytykh-pomeshcheniy-sanitarnaya-okhrana-vozdukha.php> (accessed 19 December 2020) (in Russian).
2. *Hygiene standard “Maximum permissible concentrations of harmful substances in the air of the working area”*. Resolution of the Ministry of health of the Republic of Belarus. October 11, 2017, no. 92. Available at: https://pravo.by/upload/docs/op/W21732492p_1510174800.pdf (accessed 19 December 2020) (in Russian).
3. Vulih A. I., Alovaynikov A. A., Nikandrov G. A. A new field of application of ion-exchangers is gas purification. *Ionnyj obmen: Sbornik statei* [Ion exchange. Proceeding of the USSR Academy of Sciences]. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 214–229 (in Russian).
4. Chikin G. A., Myagkoi Q. N. Ion exchangers in the gas sorption technologies. *Ion exchange methods of substances purification*. Voronezh, VGU Publ., 1984, pp. 326–367 (in Russian).
5. Soldatov V. S., Elinson I. S., Shunkevich A. A. Application of fibrous ion exchangers in air purification from acidic impurities. *Hydrometallurgy’94*. Dordrecht, Springer, 1994, pp. 837–855. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1214_57
6. 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>
7. 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).
8. Filippovich S. D., Grachek V. I., Akulich Z. I., Shunkevich A. A. *The way for producing anion-exchange fiber*. Patent Republic of Belarus no. 18091. Publ. date 30 Apr. 2014 (in Russian).
9. Shunkevich A. A., Medyak G. V., Polikarpov A. P., Pansevich V. V., Akulich Z. I. FIBAN fiber ion-exchangers for air purification from sulfur dioxide. *Sbornik dokladov i catalog XII Mezhdunarodnoi konferentsii “Pylegazoochistka-2019” (Moskva, Izmailovo, 24-25 sentiabria, 2019)* [Proceeding of XII Int. Conf. “Dust and gas cleaning” (Moscow, Izmailovo, September 24–25th, 2019)]. Moscow, 2019, pp. 62–66 (in Russian).
10. Grachek V. I., Polikarpov A. P., Shunkevich A. A., Akulich Z. I., Isakovich V. I. *The way for producing anion-exchange fiber*. Patent Republic of Belarus no. 23166. Publ. date 30 October 2020 (in Russian).
11. Shunkevich A. A., Akulich Z. I., Grachek V. I., Radkevich S. E., Vorsa V. Zh., Isakovich V. I. *The way for producing polyampholyte ion-exchange fiber*. Patent Republic of Belarus no. 12352. Publ. date 30 Augusta 2009 (in Russian).
12. Kosandrovich E. G., Doroshkevich O. N. Fibrous amino carboxylic sorbent for air purification from sulfur dioxide. *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2014, no. 1, pp. 91–95 (in Russian).

13. Kosandrovich E. G., Yakubel O. N., Nesteronok P. V., Shachenkova L. N., Soldatov V. S. Catalytic preparation method and sorption properties of the fibrous anion exchanger with ternary amino groups. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2017, no. 1, pp. 82–88 (in Russian).

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

15. Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. Sorption of ammonia from air by fibrous sulfostyrene cation exchanger FIBAN K-1. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2004, no. 3, pp. 95–98 (in Russian).

16. Kosandrovich E. G., Pushkarchuk A. L., Bezzyazchnaya T. V., Soldatov V. S. Peculiarities of sulfur dioxide sorption from air by weak base anion exchangers. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2020, no. 3, pp. 263–270 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-3-263-270>

Информация об авторах

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

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

Пансевич Виктор Васильевич – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, 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

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

Aleksandr 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

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

Viktor V. Pansevich – 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).

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