

**ХИМИЯ**  
**CHEMISTRY**

УДК 541.183.12

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-548-553>

Поступило в редакцию 11.05.2019

Received 11.05.2019

**Е. Г. Косандрович, Л. Н. Шаченкова, академик В. С. Солдатов***Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь***СОРБЦИЯ ПАРОВ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ВОЗДУХА ВОЛОКНИСТЫМИ АНИОНИТАМИ С ТРЕТИЧНЫМИ И ЧЕТВЕРТИЧНЫМИ АМИНОГРУППАМИ**

**Аннотация.** На основе полиакрилонитрильного волокна предложенным нами ранее методом каталитического аминирования нитрильных групп получен анионит, содержащий в своей структуре функциональные группы диметиламинопропиламина. Реакцией алкилирования эпихлоргидрином на его основе синтезирован анионит, содержащий в своей структуре сильноосновные группы. Определены их обменные емкости, кислотно-основные свойства, исследована сорбция паров уксусной кислоты из воздуха с переменной относительной влажностью. Установлены граничные и оптимальные условия применения полученных ионитов в процессах очистки воздуха от уксусной кислоты, динамические характеристики фильтрационных слоев.

**Ключевые слова:** волокнистый анионит, полиакрилонитрил, диметиламинопропиламин, эпихлоргидрин, воздух, сорбция, уксусная кислота

**Для цитирования:** Косандрович, Е. Г. Сорбция паров уксусной кислоты из воздуха волокнистыми анионитами с третичными и четвертичными аминогруппами / Е. Г. Косандрович, Л. Н. Шаченкова, В. С. Солдатов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 548–553. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-548-553>

**Evgenii G. Kosandrovich, Larisa N. Shachenkova, Academician Vladimir S. Soldatov***Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***SORPTION OF ACETIC ACID VAPORS FROM THE AIR BY FIBROUS ANION EXCHANGERS WITH TERNARY AND QUATERNARY AMINO GROUPS**

**Abstract.** A fibrous anion exchanger with ternary amino groups of dimethylaminopropylamine was obtained on the base of a polyacrylonitrile fiber by the previously proposed method of catalytic amination of nitrile groups. A fibrous anion exchanger with strong base functional groups was synthesized on the base of this material by the reaction of alkylation of its groups with epichlorohydrin solutions. Their exchange capacities, acid-base properties, sorption of acetic acid vapors from air with different relative humidity were determined. The boundary and optimal conditions of application of the obtained ion exchangers in the processes of air purification from acetic acid and the dynamic characteristics of filtration layers were established.

**Keywords:** fibrous anion exchanger, polyacrylonitrile, dimethylaminopropylamine, epichlorohydrin, air, sorption, acetic acid

**For citation:** Kosandrovich E. G., Shachenkova L. N., Soldatov V. S. Sorption of acetic acid vapors from the air by fibrous anion exchangers with ternary and quaternary amino groups. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 548–553 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-548-553>

**Введение.** Волокнистые аниониты широко используются для очистки воздуха и воды от примесей различной природы, органического катализа [1–4]. Они обладают неоспоримыми преимуществами при обработке воздушных сред с низким содержанием удаляемого компонента [5], что особенно важно при удалении неприятных запахов [6], проблема борьбы с которыми становится все более актуальной в последнее время [7]. Один из основных запаховых компонентов, создающих неблагоприятный фон как в производственных условиях, так и в быту, – это органические кислоты различного строения, типичным представителем которых является уксусная кислота. В связи с этим в данном сообщении представлены результаты исследования свойств полученных нами средне- и сильноосновных волокнистых ионитов в процессах поглощения примесей уксусной кислоты из воздуха.

**Материалы и методы исследования.** Волокнистые иониты получены на основе полиакрилонитрильного (ПАН) волокна Нитрон С (сополимер 92,5 % акрилонитрила, 6 % метилакрилата и 1,5 % итаконовой кислоты) производства Новополоцкого ПО «Полимир» (Беларусь). Синтез ионита с третичными аминогруппами осуществлялся способом, заключающимся в обработке исходного ПАН волокна водным раствором диметиламинопропиламина (ДМАПА) в присутствии катализатора – гидроксилamina гидрохлорида ( $\text{GA} \cdot \text{HCl}$ )<sup>1</sup>. Получение ионитов с четвертичными аминогруппами производили обработкой ионита с третичными аминогруппами водными растворами эпихлоргидрина (реакция алкилирования третичных аминогрупп). После синтеза аниониты извлекали из реактора, отмывали водой от избытка реакционного раствора и сушили на воздухе.

Кислотно-основные свойства изучены методом потенциометрического титрования, изложенным в [8; 9], с использованием многих навесок на фоне 1М КСl. Для проведения эксперимента образцы переводили в  $\text{H}^+ - \text{Cl}^-$  форму обработкой в колоночных условиях 0,5н раствором соляной кислоты, после чего окончательно отмывали дистиллированной водой до pH 3,2–3,5.

Для изучения сорбционных свойств образцы переводили в карбонатную форму (выбор такой исходной ионной формы анионитов обусловлен необходимостью подавления вторичных эффектов от взаимодействия функциональных групп ионита с углекислым газом, всегда присутствующим в атмосферном воздухе) обработкой 0,5н раствором карбоната калия и окончательной отмывкой 0,001н раствором  $\text{K}_2\text{CO}_3$  до pH  $\approx 8$ .

После отмывки полученные образцы сушили на воздухе при комнатных условиях до постоянного веса. Содержание воды в воздушно-сухом ионите определяли гравиметрически по потере массы после высушивания в течение 4 ч при температуре  $105 \pm 5$  °С.

Исследование поглощения уксусной кислоты проводилось на сорбционной установке, позволяющей проводить процесс в динамических условиях при различной толщине фильтрующего слоя и относительной влажности очищаемого воздуха. Методическое описание процедуры измерений и схема экспериментальной установки представлены в [10]. Концентрацию уксусной кислоты в газовом потоке определяли фотоколориметрически с ванадатом аммония [11].

**Результаты и их обсуждение.** Анализ кривых потенциометрического титрования, внешний вид которых представлен на рис. 1, 2, а также результаты определения обменной емкости ионитов, позволяют нам сделать вывод о том, что:

1) ионит, содержащий в своей структуре функциональные группы третичного амина, характеризуется обменной емкостью по аминогруппам  $E_{\text{амин}} = 4,2$  м-экв/г и обменной емкостью по карбоксильным группам  $E_{\text{COOH}} = 0,7$  м-экв/г; в ионите идентифицируется три типа анионообменных групп (номера групп соответствуют цифрам на рис. 1, *b*, № 1 (очень слабые):  $E_1 = 1,67$ ;  $\text{pK}_{\text{a}1} = 2,62$ ;  $\Delta\text{pK}_1 = 1,5$ ; № 2 (слабые):  $E_2 = 1,35$ ;  $\text{pK}_{\text{a}2} = 6,00$ ;  $\Delta\text{pK}_2 = 1,0$ ; № 3 (средней основности):  $E_3 = 1,17$ ;  $\text{pK}_{\text{a}3} = 9,10$ ;  $\Delta\text{pK}_3 = 1,0$ ) и один тип карбоксильных групп (№ 4 –  $E_4 = 0,67$ ;  $\text{pK}_{\text{a}4} = 10,10$ ;  $\Delta\text{pK}_4 = 1,0$ );

2) ионит, содержащий в своей структуре функциональные группы четвертичного аммониевого основания, характеризуется  $E_{\text{амин}} = 3,9$  м-экв/г и  $E_{\text{COOH}} = 0,2$  м-экв/г; в ионите идентифицируется три типа анионообменных групп (номера групп соответствуют цифрам на рис. 2, *b*, № 1 (слабые):  $E_1 = 1,12$ ;  $\text{pK}_{\text{a}1} = 4,19$ ;  $\Delta\text{pK}_1 = 1,6$ ; № 2 (средней основности):  $E_2 = 0,74$ ;  $\text{pK}_{\text{a}2} = 9,87$ ;  $\Delta\text{pK}_2 = 1,3$ ; № 3 (сильноосновные):  $E_3 = 2,0$ ;  $\text{pK}_{\text{a}3} = 13,00$ ;  $\Delta\text{pK}_3 = 1,0$ ) и один тип карбоксильных групп (№ 4 –  $E_4 = 0,24$ ;  $\text{pK}_{\text{a}4} = 9,73$ ;  $\Delta\text{pK}_4 = 1,5$ ).

Полученные иониты протестированы в экспериментах по сорбции уксусной кислоты из воздуха в динамических условиях (рис. 3, 4). Условия проведения исследований: 1) начальная концентрация уксусной кислоты – 20–24 мг/м<sup>3</sup>; 2) температура проведения исследований – 18–20 °С; 3) скорость фильтрования воздушного потока через слой материала – 0,1 м/с.

Как видно из приведенных результатов (рис. 3, 4), величина сорбции уксусной кислоты из разбавленных воздушных сред волокнистыми ионитами сильно зависит от относительной влаж-

<sup>1</sup> Способ получения волокнистого полиамфолита: пат. 15904 Респ. Беларусь: МПК С 08 J 5/20 (2006.01), D 01 F 11/06 (2006.01) / В. С. Солдатов, Е. Г. Косандрович, Д. Е. Мицкевич, А. В. Жилинская, Е. М. Полховский; дата публ.: 30.06.2012.

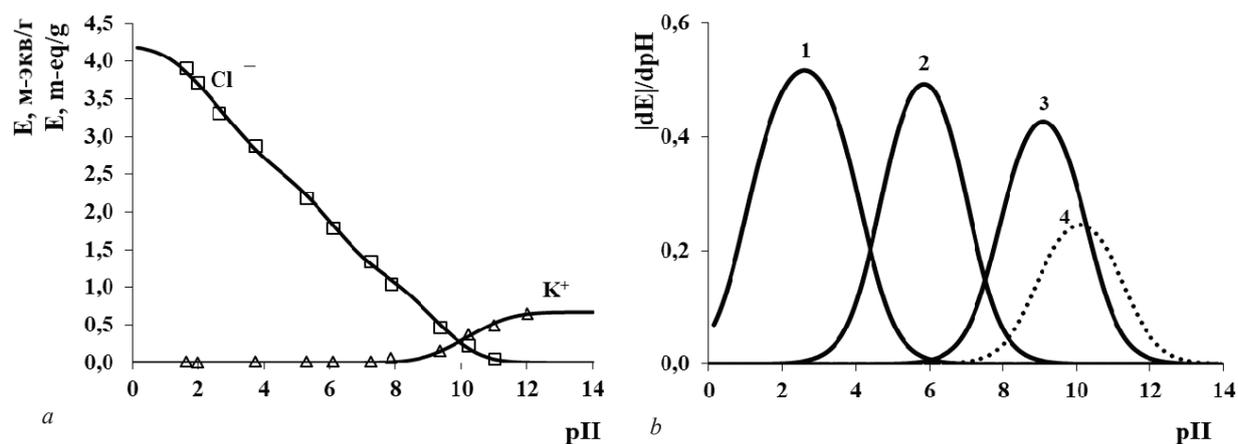


Рис. 1. Зависимость количества поглощенных ионов фонового электролита от pH равновесного раствора (a) и дифференциальные кривые титрования (b) для волокнистого ионита с третичными аминогруппами (сплошная линия – анионообменные группы; пунктирная линия – катионообменные группы; цифры у линий идентифицируют номер функциональной группы)

Fig. 1. Dependence of the amount of absorbed ions of background electrolyte on the pH of the equilibrium solution (a) and differential titration curves (b) for a fibrous ion exchanger with tertiary amino groups (solid line – anion-exchange groups; dotted line – cation-exchange groups; numbers near the lines identify the number of the functional group)

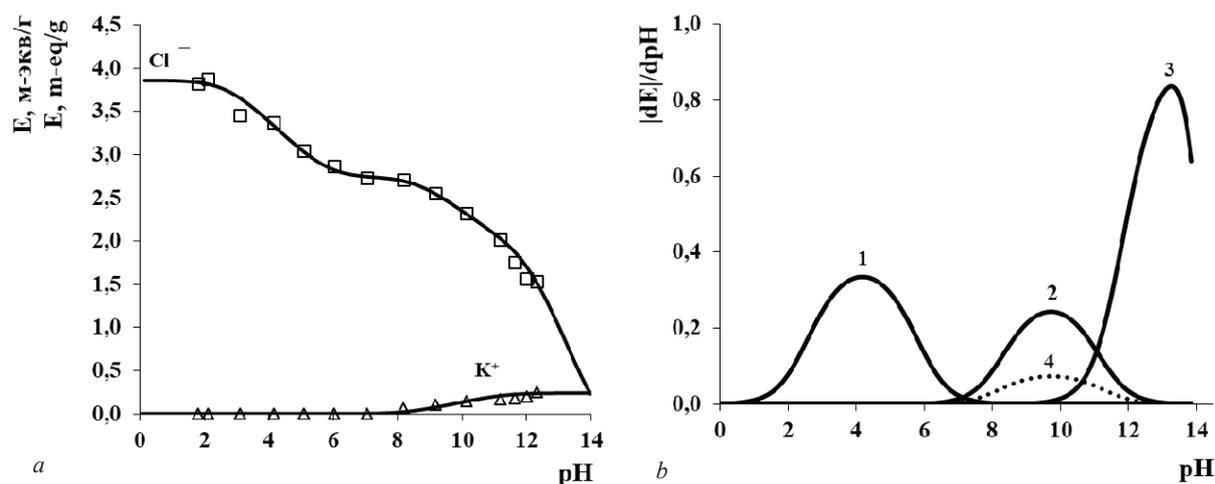


Рис. 2. Зависимость количества поглощенных ионов фонового электролита от pH равновесного раствора (a) и дифференциальные кривые титрования (b) для волокнистого ионита с четвертичными аминогруппами (сплошная линия – анионообменные группы; пунктирная линия – катионообменные группы; цифры у линий идентифицируют номер функциональной группы)

Fig. 2. Dependence of the amount of absorbed ions of background electrolyte on the pH of the equilibrium solution (a) and differential titration curves (b) for a fibrous ion exchanger with quaternary amino groups (solid line – anion-exchange groups; dotted line – cation-exchange groups; numbers near the lines identify the number of the functional group)

ности воздуха: реализуемая емкость для ионита с третичными аминогруппами меняется от 0,4 до 2,6 ммоль  $CH_3COOH/g$  при изменении влажности воздуха от 30 до 70 %; для ионита с четвертичными аминогруппами – от 0,1 до 1,6 ммоль  $CH_3COOH/g$  при изменении влажности воздуха от 30 до 80 %. Критической влажностью, ниже которой полимеры практически не проявляют сорбционной активности, является: для ионита с третичными аминогруппами ~35 %; для ионита с четвертичными аминогруппами – ~55 %, т. е. при использовании материалов в реальных условиях относительная влажность очищаемого воздуха должна составлять 35–40 % и более для среднеосновного ионита и 55–60 % и более для сильноосновного ионита.

Известно [12], что при поглощении кислот из воздуха волокнистыми анионитами могут наблюдаться эффекты сверхэквивалентной сорбции. В нашем случае также можно было ожидать

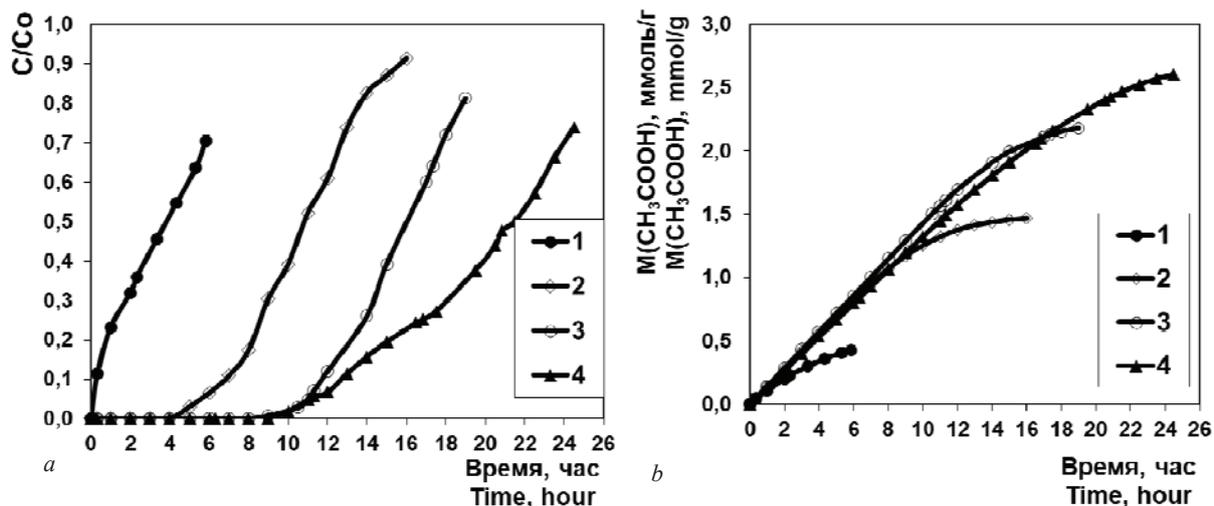


Рис. 3. Кривые проскока (а) и сорбции (б) уксусной кислоты на анионите с третичными аминогруппами ( $\text{CO}_3^{2-}$ -форма) при различной относительной влажности (толщина фильтрационного слоя 9 мм): 1 – 30 %; 2 – 40 %; 3 – 50 %; 4 – 70 %

Fig. 3. Breakthrough (a) and sorption (b) curves of acetic acid on anion exchanger with tertiary amino groups ( $\text{CO}_3^{2-}$ -ionic form) at different relative humidity (filtration layer thickness – 9 mm): 1 – 30 %; 2 – 40 %; 3 – 50 %; 4 – 70 %

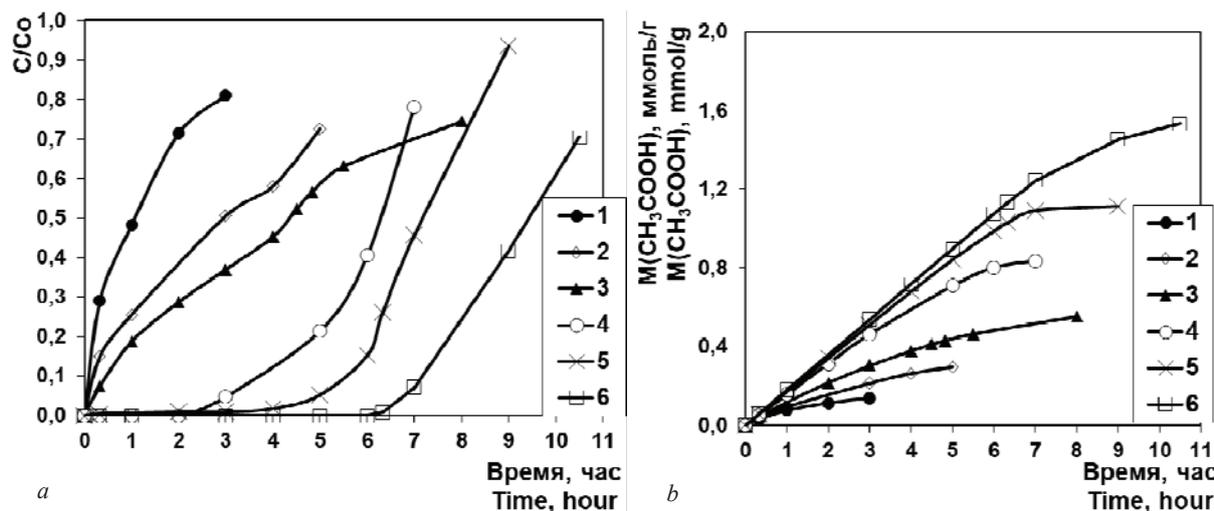


Рис. 4. Кривые проскока (а) и сорбции (б) уксусной кислоты на анионите с четвертичными аминогруппами ( $\text{CO}_3^{2-}$ -форма) при различной относительной влажности (толщина фильтрационного слоя 9 мм): 1 – 30 %; 2 – 40 %; 3 – 50 %; 4 – 60 %; 5 – 70 %; 6 – 80 %

Fig. 4. Breakthrough (a) and sorption (b) curves of acetic acid on anion exchanger with quaternary amino groups ( $\text{CO}_3^{2-}$ -ionic form) at different relative humidity (filtration layer thickness – 9 mm): 1 – 30 %; 2 – 40 %; 3 – 50 %; 4 – 60 %; 5 – 70 %; 6 – 80 %

такого явления, обусловленного образованием димеров и ассоциатов уксусной кислоты в фазе полимера (такие эффекты наблюдались авторами [13] при сорбции уксусной кислоты из воздуха с концентрацией  $2 \text{ г/м}^3$  слабоосновным анионитом ВИОН АН-1). Однако как видно из представленных на рис. 3, 4 экспериментальных данных, для концентрации уксусной кислоты в воздухе  $\sim 25 \text{ мг/м}^3$  таких эффектов не наблюдается, а максимально реализуемая сорбционная емкость ионитов составляет: для ионита с третичными аминогруппами  $2,6 \text{ ммоль/г}$ , что соответствует реализации  $\approx 62 \%$  анионообменной емкости полимера ( $E_{\text{амин}} = 4,2 \text{ м-экв/г}$ ); для ионита с четвертичными аминогруппами –  $1,6 \text{ ммоль/г}$ , что соответствует реализации  $\approx 41 \%$  общей анионообменной емкости полимера ( $E_{\text{амин}} = 3,9 \text{ м-экв/г}$ ) или  $\approx 80 \%$  анионообменной емкости по сильноосновным группам.

С использованием уравнения Шилова и соотношения Майкелса для режима параллельного переноса фронта сорбции [14] определили длину зоны массопередачи ( $L_0$ ) и динамические характеристики фильтрационных слоев исследованных ионообменных материалов. Полученные результаты представлены в таблице.

Длина зоны массопередачи и значения коэффициентов уравнения Шилова

The thickness of mass transfer zone and parameters of Shilov's equation

Ионит Ionite	$K$ , ч/мм	$u$ , мм/ч	$\tau_0$ , ч	$h$	$f$	$L_0$ , мм
С третичными аминогруппами	1,88	0,53	6,07	3,22	0,81	3,9
С четвертичными аминогруппами	1,75	0,57	4,00	2,30	0,70	3,3

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что при имеющихся условиях проведения процесса сорбции длина зоны массопередачи для исследованных волокнистых ионитов составляет  $\approx 3,5$  мм. Значения такого порядка характерны для волокнистых ионитов и, по крайней мере, на порядок меньше, чем для гранульных ионитов.

**Заключение.** На основе полиакрилонитрильного волокна предложенным нами ранее методом каталитического аминирования нитрильных групп получен анионит, содержащий в своей структуре функциональные группы диметиламинопропиламина. Реакцией алкилирования его функциональных групп растворами эпихлоргидрина синтезирован анионит, содержащий в своей структуре сильноосновные группы. Определены их обменные емкости, кислотно-основные свойства, исследована сорбция паров уксусной кислоты из воздуха с переменной относительной влажностью. Установлены граничные и оптимальные условия применения полученных ионитов в процессах очистки воздуха от уксусной кислоты, динамические характеристики фильтрационных слоев: материалы эффективно очищают воздух от  $\text{CH}_3\text{COOH}$  при невысоких относительных влажностях (критическая влажность для ионита с третичными аминогруппами составляет  $\sim 35\%$ ; для ионита с четвертичными аминогруппами –  $\sim 55\%$ ); максимальная реализуемая сорбционная емкость по уксусной кислоте составляет около 2,6 ммоль/г (ионит средней основности) и 1,6 ммоль/г (сильноосновный ионит), что соответствует реализации 62 и 41 % анионообменной емкости полимеров соответственно; расчетное значение длины зоны массопередачи  $\approx 3,5$  мм для обоих ионитов.

Список использованных источников

1. Soldatov, V. S. Syntheses and the main properties of FIBAN fibrous ion exchangers / V. S. Soldatov // Solvent extraction and ion exchange. – 2008. – Vol. 26, N 5. – P. 457–513. <https://doi.org/10.1080/07366290802301358>
2. Zverev, M. P. Fibre chemisorbents – material for environmental protection. A review / M. P. Zverev // Fibre Chemistry. – 2002. – Vol. 34, N 6. – P. 456–465. <https://doi.org/10.1023/a:1022972511231>
3. Druzhinina, T. V. Chemisorption fibres based on graft copolymers: fabrication and properties. A review / T. V. Druzhinina, L. A. Nazar'ina // Fibre Chemistry. – 1999. – Vol. 31, N 4. – P. 252–262. <https://doi.org/10.1007/bf02358329>
4. Новые каталитические системы на основе волокнистых ионитов / Ю. Г. Егизаров [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2001. – № 9. – С. 417–431.
5. Soldatov, V. S. Ion exchangers for air purification / V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich // Ion Exchange and Solvent Extraction Series. – 2011. – Vol. 20. – P. 45–117. <https://doi.org/10.1201/b10813-3>
6. Schlegelmilch, M. Odour management and treatment technologies: An overview / M. Schlegelmilch, J. Streese, R. Stegmann // Waste Management. – 2005. – Vol. 25, N 9. – P. 928–939. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.006>
7. Gostelow, P. Odour measurements for sewage treatment works / P. Gostelow, S. A. Parsons, R. M. Stuetz // Water Research. – 2001. – Vol. 35, N 3. – P. 579–597. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00313-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00313-4)
8. Soldatov, V. S. Potentiometric titration of ion exchangers / V. S. Soldatov // React. and Funct. Polym. – 1998. – Vol. 38, N 2–3. – P. 73–112. [https://doi.org/10.1016/s1381-5148\(98\)00018-2](https://doi.org/10.1016/s1381-5148(98)00018-2)
9. Нестеронок, П. В. Метод определения параметров кислотности полиамфолитов / П. В. Нестеронок, В. С. Солдатов // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2013. – № 2. – С. 31–36.
10. Косандрович, Е. Г. Сорбция аммиака из воздуха волокнистым сульфокатионитом ФИБАН К-1 / Е. Г. Косандрович, В. С. Солдатов // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2004. – № 3. – С. 95–98.
11. Перегуд, Е. А. Химический анализ воздуха / Е. А. Перегуд. – М., 1976. – 328 с.
12. Коршунова, Т. А. Поглощение хлористого водорода из воздуха волокнистыми ионитами ФИБАН / Т. А. Коршунова, Е. Г. Косандрович, В. С. Солдатов // ЖПХ. – 2010. – Т. 83, № 7. – С. 1057–1067.

13. Субботин, А. И. Очистка воздуха от паров уксусной кислоты ионитами / А. И. Субботин, В. И. Ткаченко // Пластические массы. – 1975. – № 5. – С. 38–39.
14. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М., 1973. – 752 с.

### References

1. Soldatov V. S. Syntheses and the main properties of FIBAN fibrous ion exchangers. *Solvent extraction and ion exchange*, 2008, vol. 26, no. 5, pp. 457–513. <https://doi.org/10.1080/07366290802301358>
2. Zverev M. P. Fibre chemisorbents – material for environmental protection. A review. *Fibre Chemistry*, 2002, vol. 34, no. 6, pp. 456–465. <https://doi.org/10.1023/a:1022972511231>
3. Druzhinina T. V., Nazar'ina L. A. Chemisorption fibres based on graft copolymers: fabrication and properties. A review. *Fibre Chemistry*, 1999, vol. 31, no. 4, pp. 252–262. <https://doi.org/10.1007/bf02358329>
4. Egiazarov Yu. G., Potapova L. L., Radkevich V. Z., Soldatov V. S., Shunkevich A. A., Cherches B. Kh. New catalytic systems based on fibrous ion exchangers. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*, 2001, no. 9, pp. 417–431 (in Russian).
5. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. Ion exchangers for air purification. *Ion Exchange and Solvent Extraction Series*, 2011, vol. 20, pp. 45–117. <https://doi.org/10.1201/b10813-3>
6. Schlegelmilch M., Streese J., Stegmann R. Odour management and treatment technologies: An overview. *Waste Management*, 2005, vol. 25, no. 9, pp. 928–939. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.006>
7. Gostelow P., Parsons S. A., Stuetz R. M. Odour measurements for sewage treatment works. *Water Research*, 2001, vol. 35, no. 3, pp. 579–597. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00313-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00313-4)
8. Soldatov V. S. Potentiometric titration of ion exchangers. *Reactive and Functional Polymers*, 1998, vol. 38, no. 2–3, pp. 73–112. [https://doi.org/10.1016/s1381-5148\(98\)00018-2](https://doi.org/10.1016/s1381-5148(98)00018-2)
9. Nesteronok P. V., Soldatov V. S. A method for determination of polyampholytes' acidity parameters. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series*, 2013, no. 2, pp. 31–36 (in Russian).
10. Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. Ammonia sorption from air by FIBAN K-1 fibrous sulphonic cation exchanger. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemistry Series*, 2004, no. 3, pp. 95–98 (in Russian).
11. Peregud E. A. *Chemical air analysis*. Moscow, 1976. 328 p. (in Russian).
12. Korshunova T. A., Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. Hydrogen chloride absorption from the air with the fibrous ion exchangers fiban. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2010, vol. 83, no. 7, pp. 1159–1169. <https://doi.org/10.1134/s1070427210070013>
13. Subbotin A. I., Tkachenko V. I. Air purification from acetic acid vapors with ion exchangers. *Plasticheskiye massy = Plastics*, 1975, no. 5, pp. 38–39 (in Russian).
14. Kasatkin A. G. *Basic processes and apparatuses of chemical technology*. Moscow, 1973. 752 p. (in Russian).

### Информация об авторах

Косандрович Евгений Генрихович – канд. хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by.

Шаченкова Лариса Николаевна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sln13102005@mail.ru.

Солдатов Владимир Сергеевич – академик, д-р хим. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by.

### Information about the authors

Kosandrovich Evgenii Genrikhovich – Ph. D. (Chemistry), Associate professor, Head of the Laboratory. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by.

Shachenkova Larisa Nikolaevna – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sln13102005@mail.ru.

Soldatov Vladimir Sergeevich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Chief researcher. Institute Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by.