

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ
PHYSICAL CHEMISTRY

УДК 541.183.12
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-7-14>

Поступила в редакцию 26.12.2019
Received 26.12.2019

Е. Г. Косандрович, Л. Н. Шаченкова, А. Л. Пушкарчук, Т. В. Безъязычная, В. С. Солдатов

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

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СОРБЦИИ ЭТИЛАМИНОВ
ИЗ ВОЗДУХА ВОЛОКНИСТЫМИ КАТИОНИТАМИ
В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СОРБАТА**

Аннотация. Предложена математическая модель, позволяющая описывать зависимость величины сорбции ионитами протонизирующихся в водных растворах щелочных соединений (на примере аммиака, моно-, ди- и триэтиламина). Для этих веществ экспериментально определены константы Генри. Модель учитывает концентрацию и кислотно-основные свойства сорбата, относительную влажность воздуха, кислотно-основные свойства и обменную емкость ионита, доступность функциональных групп для взаимодействия в условиях ограниченной проницаемости полимерного ионита. Показано хорошее соответствие рассчитанных по модели и экспериментальных данных по сорбции аммиака и этиламина из воздуха волокнистыми карбоксильным и сульфонионом.

Ключевые слова: волокнистый ионит, сорбция, воздух, аммиак, этиламин, диэтиламин, триэтиламин, константа Генри

Для цитирования. Математическое описание сорбции этиламина из воздуха волокнистыми катионитами в условиях ограниченной проницаемости сорбата / Е. Г. Косандрович [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 7–14. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-7-14>

**Evgenii G. Kosandrovich, Larisa N. Shachenkova, Alexander L. Pushkarchuk,
Tatyana V. Bez'yazychnaya, Vladimir S. Soldatov**

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

**MATHEMATICAL DESCRIPTION OF ETHYLAMINE SORPTION FROM AIR BY FIBROUS CATION
EXCHANGERS UNDER CONDITIONS OF LIMITED SORBATE PERMEABILITY**

Abstract. A mathematical model for description of the sorption capacity of ion exchangers on alkaline compounds protonizable in aqueous solutions (exemplified by ammonia, mono-, di- and triethylamine) was proposed. The Henry's constants for these substances were experimentally determined. The model accounts for the concentration and acid-base properties of the sorbate, relative air humidity, acid-base properties and exchange capacity of the ion exchanger, as well as spatial availability of functional groups for interaction under conditions of limited permeability of polymeric ion exchanger. The applicability of the model is illustrated by processing the experimental results on the sorption of ammonia and ethylamines by fibrous carboxylic and sulfonic cation exchangers. Good agreement between the calculated and experimental data is observed.

Keywords: fibrous ion exchanger, sorption, air, ammonia, ethylamine, diethylamine, triethylamine, Henry's constant

For citation. Kosandrovich E. G., Shachenkova L. N., Pushkarchuk A. L., Bez'yazychnaya T. V., Soldatov V. S. Mathematical description of ethylamine sorption from air by fibrous cation exchangers under conditions of limited sorbate permeability. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 7–14 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-7-14>

Введение. Летучие амины, присутствующие в воздухе, вызывают неприятный запах и токсичность многих промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов. В настоящее время уделяется большое внимание качеству воздуха жилых зон, что включает в себя разработку методов его очистки от неприятно пахнущих веществ, в частности от аминов [1–3]. Одним из способов решения этой задачи является использование фильтровальных установок с волокнистыми ионитами [4–6]. В нашем случае это катионообменные волокна с сульфо- или карбо-

кислыми группами [7, 4]. Ранее нами была показана эффективность таких материалов при очистке воздуха от аммиака и этиламина [8–12]. До настоящего времени невозможно теоретически рассчитать ресурс работы ионообменных материалов с учетом основных параметров, влияющих на величину сорбции: влажность воздуха, кислотность ионита и удаляемого компонента. Необходимость решения данного вопроса обусловлена длительностью и высокой стоимостью экспериментального определения ресурса работы при глубокой очистке воздуха от щелочных загрязнений, а также разнообразием условий эксплуатации: при невысоких исходных концентрациях удаляемых веществ продолжительность единичного эксперимента может достигать до одного года, а условия эксплуатации ионитов в каждом отдельном случае индивидуальны. Ранее нами предложена такая модель [13, 14] и показана ее применимость для теоретического расчета сорбции аммиака сильно- и слабокислотными волокнистыми катионитами. Однако ее применимость к другим щелочным загрязнителям не была доказана. Цель настоящей работы – расширение предложенных подходов и модели на процессы сорбции этиламина из воздуха.

Экспериментальная часть. Определение равновесных концентраций аммиака и аминов в растворе и воздухе. В колбу емкостью 1 л помещали 300 мл водного раствора целевого соединения (аммиак, этиламин, диэтиламин, триэтиламин), герметично закрывали и выдерживали в термостате при $25 \pm 0,1$ °C в течение 7 сут. После установления равновесия производили анализ концентрации вещества в равновесной газовой (с использованием газоанализатора КОЛИОН-1В) и водной (с использованием С-анализатора Multi N/C UV HS) фазах.

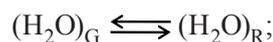
Сорбция аммиака и аминов. Исследование поглощения аммиака и аминов проводили на сорбционной установке, позволяющей осуществлять процесс в динамических условиях, при различной относительной влажности очищаемого воздуха. Методическое описание процедуры измерений и схема экспериментальной установки представлены в работе [15].

Результаты и их обсуждение. Загрязненный очищаемый воздух, кроме сорбата и паров воды, может содержать другие компоненты воздуха, которые считаем инертными (не участвующими в сорбционном процессе).

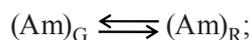
В растворах таких высоких концентраций, которые реализуются в оводненном ионите (молярности порядка нескольких единиц или десятков единиц), большая часть объема недоступна для движения не входящих в гидраты молекул воды и сорбата, так как занята матрицей полимера и молекулами воды, входящих в гидраты. Диффузионной средой является только та часть внутреннего объема, которая занята свободными молекулами воды. Поэтому в качестве единиц концентрации компонентов в ионите в модели используется число молей компонента на килограмм свободной воды (расчет количества (мольной доли) свободной воды в ионите производился с использованием модели преобладающих гидратов [16] на основании экспериментальных данных по поглощению паров воды из воздуха).

Процесс поглощения щелочного сорбата (Am) ионитом, содержащим в своей структуре кислотные функциональные группы, может быть представлен следующей последовательностью элементарных процессов (используемые индексы: «G» – газовая фаза; «R» – фаза полимерного ионита):

1) сорбция воды ионитом:



2) растворение (Am) в оводненном ионите:



3) ионизация (Am) в фазе ионита, ионный обмен и нейтрализация:



Уравнения констант этих процессов, положенные в основу вывода конечного уравнения предложенной модели и сделанные допущения (детальный вывод представлен в [14]), приводят в конечном итоге к выражению:

$$X = K_{\text{Henry}} X_w [Am]_G K_d / (K_{\text{hyd}} + K_d K_{\text{Henry}} X_w [Am]_G), \quad (1)$$

где X – степень насыщения ионита ионом $(AmH)^+$ (отн. ед.); K_{Henry} – константа Генри, выраженная в размерностях $(\text{моль}_{Am}/\text{кг}_{\text{воды}})/[\text{мг}_{Am}/\text{м}^3_{\text{воздуха}}]$, удобных для последующих расчетов; X_w – мольная доля свободной воды в ионите, отн. ед.; $[Am]_G$ – концентрация (Am) в газовой фазе $(\text{мг}/\text{м}^3)$; K_d – константа диссоциации протонизированного (Am) ; K_{hyd} – константа гидролиза $(AmH)^+$ формы ионита.

Одним из параметров, используемых в полученном уравнении (1), является константа Генри, численные значения которых для рассматриваемых соединений (аммиак, моно-, ди- и триэтиламин) в справочной литературе отсутствуют. Нами экспериментально исследованы равновесия систем «водный раствор–газовая фаза» для указанных веществ в статических условиях при $25 \pm 0,1$ °C и рассчитаны константы Генри с учетом констант их диссоциации, так как часть аммиака и аминов находятся в водном растворе в протонизированном состоянии, а закон Генри устанавливает взаимосвязь между концентрацией вещества в газовой фазе и молекулярной (неионизированной) формой этого вещества в водной фазе (детальный расчет приведен в [17]). Результаты представлены в виде графиков на рис. 1.

Как следует из представленных на рис. 1 данных, полученные закономерности имеют линейный характер с коэффициентом детерминации R^2 не ниже 0,982, что свидетельствует о правомерности использования закона Генри для всех веществ в исследованном концентрационном диапазоне (от 0 до 200 $\text{мг}/\text{м}^3$; данный интервал концентраций представляет наибольший практический интерес для процессов ионообменной очистки воздуха). Константа K_{Henry} определена как коэффициент k линейного уравнения $y = kx$ (уравнение представлено на графиках рис. 1 и соответствует уравнению закона Генри).

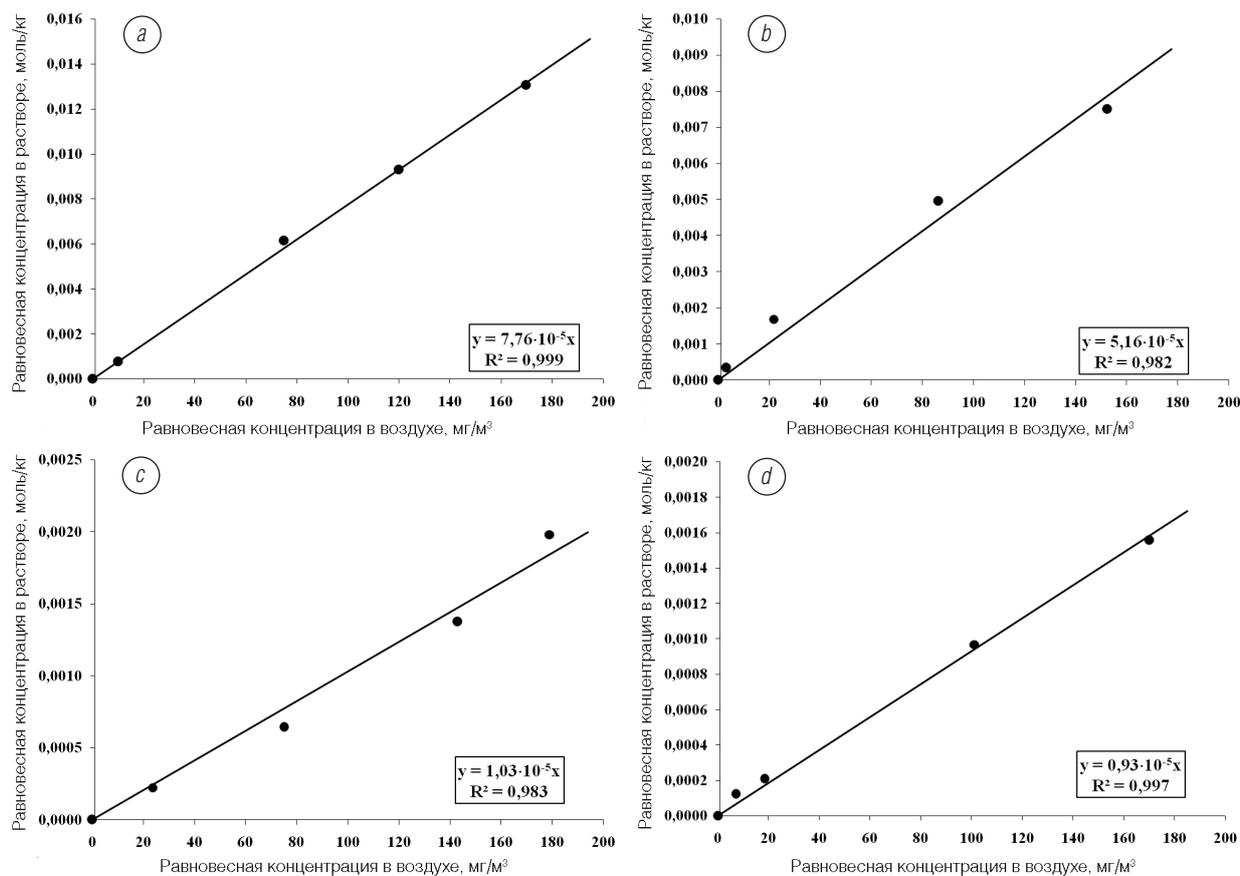


Рис. 1. Зависимость концентрации неионизированных форм аммиака и аминов в растворе от их концентрации в воздухе при 25 °C: *a* – аммиак; *b* – этиламин; *c* – диэтиламин; *d* – триэтиламин

Fig. 1. The dependence of the concentration of non-ionized forms of ammonia and amines in the water solution on their concentration in the air at 25°C: *a* – ammonia; *b* – ethylamine; *c* – diethylamine; *d* – triethylamine

Уравнение (1) модели успешно опробовано ранее при описании сорбции аммиака волокнистым карбоксильным катионитом ФИБАН К-4 (обменная емкость – 4,2 м-экв/г; набухание ($\gamma_{\text{воды}}/\gamma_{\text{ионита}}$): H^+ -форма – 0,6, NH_4^+ -форма – 0,9, этиламин-форма – 1,8, диэтиламин-форма – 1,9, триэтиламин-форма – 1,8) и сульфостирольным волокнистым ионитом ФИБАН К-1 (обменная емкость – 3,0 м-экв/г; набухание ($\gamma_{\text{воды}}/\gamma_{\text{ионита}}$): H^+ -форма – 1,2; NH_4^+ -форма – 0,9; этиламин-форма – 0,8; диэтиламин-форма – 0,8; триэтиламин-форма – 0,8) [18]. Однако попытка распространить данную модель без учета размеров молекулы поглощаемого вещества на процессы сорбции этиламинов различной степени замещенности (этиламин, диэтиламин, триэтиламин) этими же ионитами оказалась неудачной – экспериментальные и расчетные данные не совпадали (рис. 2, 3), несмотря на то, что с термодинамической точки зрения процесс взаимодействия рассмотренных аминов с функциональной кислотной группой по сравнению с аммиаком должен протекать более благоприятно, так как амины являются более сильными основаниями, чем аммиак (таблица). Причиной получаемых расхождений может являться ограниченная доступность групп ионита молекулам аминов.

В работах [11, 12] на основании экспериментальных данных по сорбции этил-, диэтил- и триэтиламина из водных растворов показано, что пространственных затруднений при взаимодействии с карбоксильным и сульфостирольным ионитами в предельно набухшем состоянии нет. На основании этого мы предположили, что причиной получаемых расхождений теоретических расчетов

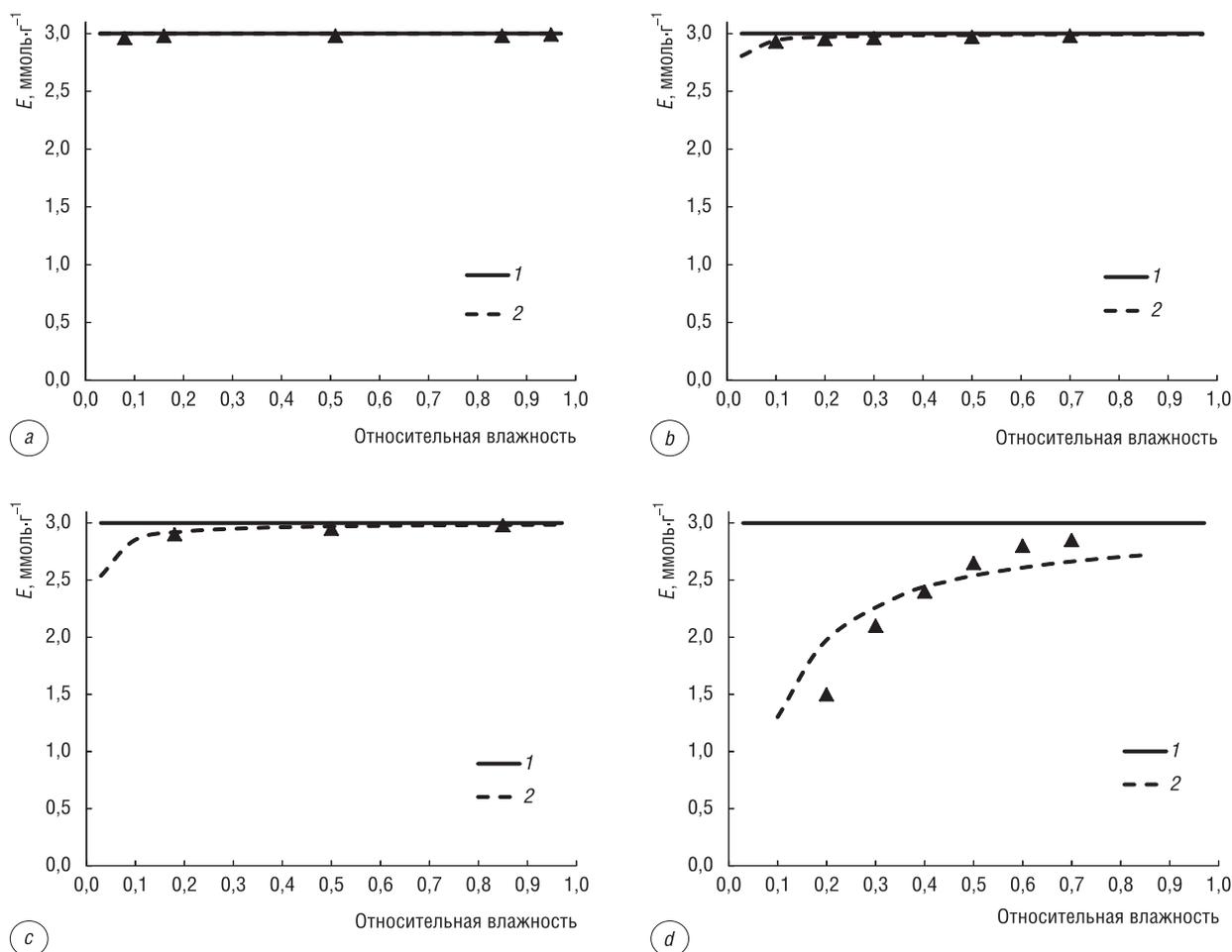


Рис. 2. Предельная сорбция аммиака и аминов волокнистым сульфокатионитом ФИБАН К-1 в зависимости от относительной влажности воздуха: *a* – аммиак, *b* – этиламин, *c* – диэтиламин, *d* – триэтиламин; точки – экспериментальные данные, кривые 1, 2 – расчетные данные по уравнению (1) и (2) соответственно, параметры представлены в таблице

Fig. 2. The maximum sorption of ammonia and amines by the fibrous sulfostyrene cation exchanger FIBAN K-1 depending on the relative air humidity: *a* – ammonia; *b* – ethylamine; *c* – diethylamine; *d* – triethylamine; points – experimental data, curves 1, 2 – calculated data according to the equations (1) and (2), respectively, parameters are presented in the table

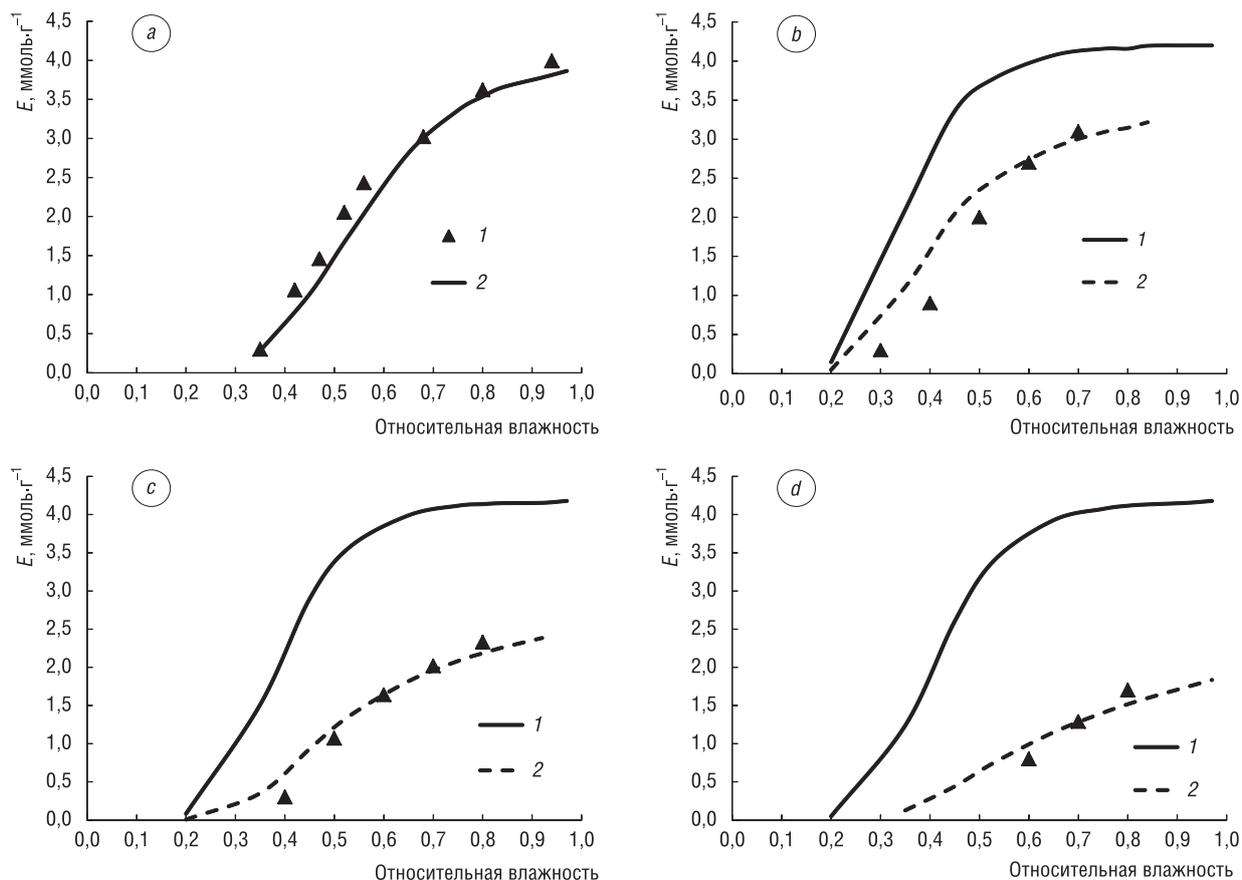


Рис. 3. Предельная сорбция аммиака и аминов волокнистым карбоксильным ионитом ФИБАН К-4 в зависимости от относительной влажности воздуха: *a* – аммиак, *b* – этиламин, *c* – диэтиламин, *d* – триэтиламин; точки – экспериментальные данные, кривые 1, 2 – расчетные данные по уравнению (1) и (2) соответственно, параметры представлены в таблице

Fig. 3. The maximum sorption of ammonia and amines by the fibrous carboxylic cation exchanger FIBAN K-4 depending on the relative air humidity: *a* – ammonia; *b* – ethylamine; *c* – diethylamine; *d* – triethylamine; points – experimental data, curves 1, 2 – calculated data according to the equation (1) and (2), respectively, parameters are presented in the table

с экспериментальными результатами является ограниченная (затрудненная) проницаемость молекул сорбата к функциональным группам ионита в неполностью набухшем состоянии. Для применимости модели к таким системам уравнение (1) было модифицировано путем введения дополнительной переменной, зависящей от влажности воздуха. Оказалось, что такой переменной может быть величина $\psi^{1/\alpha}$, где α – относительная влажность воздуха (отн. ед.), а ψ – эмпирическая постоянная, которую можно назвать коэффициентом проницаемости и найти путем подбора для максимального соответствия расчетных и экспериментальных данных зависимости $E = f(\alpha)$. При $\psi = 1$ затруднений нет и процесс сорбции определяется только термодинамическими параметрами; при значениях ψ , приближающихся к нулю, сорбция все более затруднена (при $\psi = 0$ – вообще невозможна). Уравнение модели для теоретического расчета сорбции щелочных сорбатов из воздуха примет вид:

$$X = K_{\text{Henry}} X_w [Am]_G K_d \psi^{1/\alpha} / (K_{\text{hyd}} + K_d K_{\text{Henry}} X_w [Am]_G). \quad (2)$$

Применимость полученной модели иллюстрируется рис. 2, 3, содержащими рассчитанные по уравнениям (1) и (2) и экспериментальные величины сорбции аммиака и этиламинов волокнистыми карбоксильным (ФИБАН К-4) и сульфостирольным (ФИБАН К-1) ионитами при различной относительной влажности воздуха (на рисунках реализуемая сорбционная емкость E рассчитана как произведение обменной емкости ионита на степень насыщения ионита сорбатом (X) при определенной относительной влажности). Численные значения расчетных параметров уравнений (1) и (2) представлены в таблице.

Численные значения коэффициентов расчетных уравнений (1) и (2)
Numerical values of the coefficients of the calculation equations (1) and (2)

Параметр	Аммиак	Этиламин	Диэтиламин	Триэтиламин
K_{Henry}^*	$7,76 \cdot 10^{-5}$	$5,16 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	$0,93 \cdot 10^{-5}$
K_d	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$5,62 \cdot 10^{-4}$	$9,55 \cdot 10^{-4}$	$7,41 \cdot 10^{-4}$
$[Am]_G$, мг/м ³	18	25	33	33
V^{**} , Å ³	22,71	57,21	91,63	126,20
S_{max}^{**} , Å ²	11,50	22,62	34,57	42,62
S_{min}^{**} , Å ²	8,49	16,39	18,91	29,50
Сульфостирольный катионит ФИБАН К-1				
pK	–0,3			
ΔpK	0,0			
ψ	1,000	0,998	0,995	0,920
Карбоксильный катионит ФИБАН К-4				
pK	4,9			
ΔpK	0,5			
ψ	1,00	0,80	0,60	0,45

* В расчетах константа Генри выражена в (моль_{Ам}/кг_{воды})/(мг_{Ам}/м³_{воздуха}).

** Ван-дер-Ваальсовый объем молекулы (V), максимальную (S_{max}) и минимальную (S_{min}) площадь проекции молекулы на плоскость рассчитали с помощью программы MarvinSketch 19.20, разработанной корпорацией ChemAxon Ltd [URL: <https://chemaxon.com/products/marvin> – дата обращения: 18.09.2019].

Как видно, расчетные и экспериментальные данные имеют достаточно хорошее совпадение с учетом условий ограниченной проницаемости ионитов для сорбатов. С увеличением размера молекулы поглощаемого соединения (параметры V , S_{max} и S_{min} в таблице) проницаемость сорбата в фазу полимера ухудшается, о чем свидетельствует все большее отличие коэффициента проницаемости от единицы. Причем для карбоксильного катионита это выражено более отчетливо, что может быть обусловлено его худшей способностью поглощать пары воды из воздуха по сравнению с сульфоионитом (максимальное значение сорбции паров воды для карбоксильного катионита составляет 2,5–3,0 моль_{воды}/г, для сульфоионита – 16,0 моль_{воды}/г).

Полученное уравнение может быть использовано для теоретической оценки сорбционной емкости волокнистых ионитов в процессах очистки воздуха от щелочных компонентов с использованием только экспериментальных данных по поглощению паров воды из воздуха.

Заключение. Предложена математическая модель для теоретического расчета величины сорбции ионитами протонирующихся в водных растворах щелочных соединений (на примере аммиака, моно-, ди- и триэтиламина). На основании экспериментальных данных по равновесному распределению аммиака и этиламина в системах «водный раствор–газовая фаза» при $25 \pm 0,1$ °C рассчитаны константы Генри K_{Henry} (моль_{Ам}/кг_{воды})/(мг_{Ам}/м³_{воздуха}): 1) аммиак – $7,76 \cdot 10^{-5}$; 2) этиламин – $5,16 \cdot 10^{-5}$; 3) диэтиламин – $1,03 \cdot 10^{-5}$; 4) триэтиламин – $0,93 \cdot 10^{-5}$. Показано, что закон Генри соблюдается по крайней мере в интервале концентраций 0–200 мг/м³. Модель учитывает концентрацию и кислотно-основные свойства сорбата, относительную влажность воздуха, кислотно-основные свойства и обменную емкость ионита, доступность функциональных групп для взаимодействия в условиях ограниченной проницаемости полимерного ионита (для учета данного фактора предложено использовать коэффициент проницаемости, отражающий зависимость проницаемости полимерной фазы от размера молекул сорбата).

Применимость модели проиллюстрирована обработкой экспериментальных результатов по сорбции аммиака и этиламина волокнистыми карбоксильным и сульфоионитом. Показано хорошее соответствие рассчитанных по модели и экспериментальных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Gostelov, P. Odour measurements for sewage treatment works / P. Gostelov, 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)
- Hayes, E. T. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland / E. T. Hayes, T. P. Curran, V. A. Dodd // *Bioresource Technology*. – 2006. – Vol. 97, N 7. – P. 940–948. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.04.023
- Removal of methylamine from air by means of fibrous ion exchangers / H. Wasag [et al.] // III ogólnopolski kongres inżynierii środowiska. Lublin, Poland. 13–17 september. – 2009. – P. 247–253.
- 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>
- Airborn Molecular Contamination. Chemical filters – the right solution for every customer [Electronic Resource] // *Technical Bulletin of M+W Zander Ltd, Stuttgart, Germany*. 2001. – Mode of access: <https://www.entegris.com/content/dam/shared-product-assets/vaporsorb/brochure-airborne-molecular-contamination-solutions-for-the-microelectronics-industry-10092.pdf>. – Date of access: 18.10.2019.
- PURATEX Air Chemical Filters, Technical Bulletin of TAKUMA Co., Ltd, Japan [Electronic Resource]. – Mode of access: https://www.takuma.co.jp/english/investor/annual_report/images/2017/annualreport2017. – Date of access: 05.10.2019.
- Soldatov, V. S. Synthesis, structure and applications of new fibrous ion exchangers / V. S. Soldatov, A. A. Shunkevich, G. I. Sergeev // *React. Polymers*. – 1988. – N 7. – P. 159–172. [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(88\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0167-6989(88)90136-5)
- A strong acid nonwoven filtering medium for deep air purification / V. S. Soldatov [et al.] // *Fibres and textiles in Eastern Europe*. – 2004. – Vol. 12, N 4. – P. 56–61.
- Odour control by fibrous ion exchangers / V. S. Soldatov [et al.] // *Chemical Engineering Transactions. Proceedings of NOSE2008: 1st International Conference on Environmental Odour Monitoring and Control*. 6–8 July 2008. Rome. Italy. – 2008. – Vol. 15. – P. 387–395.
- Removal of ammonia from air by fibrous ion exchangers / H. Wasag [et al.] // *Environment protection engineering*. – 2009. – Vol. 35, N 3. – P. 293–304.
- Косандрович, Е. Г. Сорбция первичных, вторичных и третичных этиламинов из воздуха волокнистыми ионитами. 1. Сильнокислотный сульфокатионит ФИБАН К-1 / Е. Г. Косандрович // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2014. – № 4. – С. 11–15.
- Сорбция первичных, вторичных и третичных этиламинов из воздуха волокнистыми ионитами. 2. Слабокислотный карбоксильный катионит ФИБАН К-4 / О. Н. Дорошкевич [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2014. – № 4. – С. 16–20.
- Soldatov, V. S. Chemical equilibria between the ion exchanger and gas phase / V. S. Soldatov, E. G. Kosandrovich // *Recent advances in Ion Exchange Theory and Practice (Proceedings of IEX 2008)*, Fitzwilliam College, Cambridge, 9–11 July. – 2008. – P. 103–110.
- Солдатов, В. С. Теоретическое описание сорбционных равновесий в системах ионит-газ / В. С. Солдатов, Е. Г. Косандрович // *Химия и технология новых веществ и материалов: сб. науч. трудов / под ред. А. В. Бильдюкевича [и др.]*. – Минск: Белорус. наука, 2008. – Вып. 2 – С. 206–228.
- Косандрович, Е. Г. Сорбция аммиака из воздуха волокнистым сульфокатионитом ФИБАН К-1 / Е. Г. Косандрович, В. С. Солдатов // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2004. – № 3. – С. 95–98.
- Soldatov, V. Hydration of ion exchangers: thermodynamics and quantum chemistry calculations. II an improved variant of the predominant hydrates model / V. Soldatov, V. Zelenkovskii, E. Kosandrovich // *React. and Funct. Polym.* – 2016. – Vol. 102. – P. 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.03.014>
- Косандрович, Е. Г. Распределение аммиака, моно-, ди- и триэтиламина в системе «водный раствор-газовая фаза» / Е. Г. Косандрович, Л. Н. Шаченкова, В. С. Солдатов // *Докл. Нац. акад. наук Беларусі*. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 164–168. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-164-168>
- Kosandrovich, E. G. Fibrous ion exchangers / E. G. Kosandrovich, V. S. Soldatov // *Ion exchange technology I: theory and materials / ed. by Inamuddin [et al.]*. – London, 2012. – P. 299–371. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8_9

References

- Gostelov 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)
- Hayes E. T., Curran T. P., Dodd V. A. Odour and ammonia emissions from intensive pig units in Ireland. *Bioresource Technology*, 2006, vol. 97, no. 7, pp. 940–948. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.023>
- Wasag H., Guz L., Sobczuk H., Czerwinski J., Kujawska J. Removal of methylamine from air by means of fibrous ion exchangers. *III ogólnopolski kongres inżynierii środowiska. Lublin, Poland, 13–17 september, 2009*. Lublin, 2009, pp. 247–253.
- 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>
- Airborn Molecular Contamination. Chemical filters – the right solution for every customer. *Technical Bulletin of M+W Zander Ltd, Stuttgart, Germany*. 2001. Available at: <https://www.entegris.com/content/dam/shared-product-assets/vaporsorb/brochure-airborne-molecular-contamination-solutions-for-the-microelectronics-industry-10092.pdf> (accessed 18 October 2019).
- PURATEX Air Chemical Filters. *Technical Bulletin of TAKUMA Co., Ltd, Japan*. Available at: https://www.takuma.co.jp/english/investor/annual_report/images/2017/annualreport2017 (accessed 05 October 2019).

7. Soldatov V. S., Shunkevich A. A., Sergeev G. I. Synthesis, structure and applications of new fibrous ion exchangers. *Reactive Polymers*, 1988, no. 7, pp. 159–172. [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(88\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0167-6989(88)90136-5)
8. Soldatov V. S., Polus Z., Pawlowska M., Maczka I., Shunkevich A., Kosandrovich E., Polikarpov A. A strong acid non-woven filtering medium for deep air purification. *Fibres and textiles in Eastern Europe*, 2004, vol.12, no 4, pp. 56–61.
9. Soldatov V. S., Wasag H., Kosandrovich E. G., Sobczuk H. Odour control by fibrous ion exchangers. *Chemical Engineering Transactions. Proceedings of NOSE2008: 1st International Conference on Environmental Odour Monitoring and Control. 6–8 July 2008*. Rome. Italy, 2008, vol. 15, pp. 387–395.
10. Wasag H., Pawlowski L., Soldatov V., Kosandrovich E. Removal of ammonia from air by fibrous ion exchangers. *Environment protection engineering*, 2009, vol. 35, no 3, pp. 293–304.
11. Kosandrovich E. G. Sorption of primary, secondary and tertiary ethylamines from the air with fibrous ion exchangers. 1. Strongly acid sulfocationite FIBAN K-1. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2014, no. 4, pp. 11–15 (in Russian).
12. Doroshkevich O. N., Kosandrovich E. G. Kashinskiy A. V., Shachenkova L. N., Zelenkovskii V. M. Sorption of primary, secondary and tertiary ethylamines from the air with fibrous ion exchangers. 2. Weak-acid carboxyl cation exchanger FIBAN K-4. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2014, no. 4, pp. 16–20 (in Russian).
13. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. Chemical equilibria between the ion exchanger and gas phase. *Recent advances in Ion Exchange Theory and Practice (Proceedings of IEX 2008), Fitzwilliam College, Cambridge 9–11 July, 2008*, pp. 103–110.
14. Soldatov V. S., Kosandrovich E. G. Theoretical description of sorption equilibria in ion-gas systems. *Khimiya i tekhnologiya novykh veshchestv i materialov: sb. nauch. trudov* [Chemistry and technology of new substances and Materials: a collection of scientific works]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2008, iss. 2, pp. 206–228 (in Russian).
15. 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. Chemical series*, 2004, no. 3, pp. 95–98 (in Russian).
16. Soldatov V., Zelenkovskii V., Kosandrovich E. Hydration of ion exchangers: thermodynamics and quantum chemistry calculations. II an improved variant of the predominant hydrates model. *Reactive and Functional Polymers*, 2016, vol. 102, pp. 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.03.014>
17. Kosandrovich E., Shachenkova L., Soldatov V. Distribution of ammonia, mono-, di- and triethylamine in the “Water solution раствор gas phase” system. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 164–168 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-164-168>
18. Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. Fibrous ion exchangers. *Ion exchange technology I: theory and materials*. London, GB, 2012, pp. 299–371. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8_9

Информация об авторах

Косандрович Евгений Генрихович – канд. хим. наук, доцент, зав. лаб. Институт физико-органической химии, Национальная академия наук 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, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sln13102005@mail.ru. Tel.:(+37529)342-65-96

Пушкарчук Александр Леонидович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexp51@bk.ru

Безъязычная Татьяна Владимировна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kvant@ifoch.bas-net.by

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

Information about the authors

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

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

Alexander L. Pushkarchuk – Ph. D. (Physics), Senior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (13, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexp51@bk.ru

Tatyana V. Bezyazychnaya – Ph. D. (Physics), Senior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (13, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kvant@ifoch.bas-net.by

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