

ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕОЛИТА

А. А. Попова, И. Н. Шубин

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
alyona.popova.93@list.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: моделирование; модифицирование; сорбция; углеродные нанотрубки; цеолит.

Аннотация: Предложена технология модифицирования углеродными нанотрубками одного из наиболее распространенных промышленных сорбентов – цеолита марок СаА и NaX. Технология модифицирования заключалась в приготовлении многокомпонентной смеси нано- и микродисперсных сыпучих материалов, содержащей цеолит, углеродные нанотрубки (УНТ) и, в качестве связующего, бентонитовую глину. Полученная смесь формовалась, высушивалась и проходила термообработку.

Экспериментально установлено оптимальное содержание связующего (20 и 30 %) и углеродных нанотрубок (2,5 и 2 %) для модифицированных вариантов цеолитов СаА + УНТ и NaX + УНТ соответственно. Определена сорбционная емкость модифицированных цеолитов по парам толуола.

Применение новых материалов и технологий в решении экологических задач по своей актуальности все чаще выходит на первое место при проектировании и модернизации различных производств. Это связано, как правило, с интенсификацией протекающих технологических процессов, использованием новых технологий и, как следствие, появлением разных отходов. В основе защитных устройств преимущественно используют различные промышленные сорбенты, повышение эффективности которых является важнейшим параметром защитного действия. Для этого применяют целый ряд методов и подходов, из которых наиболее перспективным представляется модифицирование углеродными нанотрубками [1 – 7].

Проведенный анализ основных видов промышленных сорбентов показал, что целесообразно для модифицирования использовать цеолит, преимущества которого заключаются в универсальности областей его применения, доступной стоимости, возможности многократного использования, стабильных эксплуатационных характеристиках. В результате, в качестве исходного материала для модифицирования выбран цеолит марок СаА и NaX [8].

Существует большое число способов модифицирования сорбентов: нанесение на поверхность сорбента полимерной матрицы наноразмерных частиц металлов, химическая обработка с нагреванием в водных растворах при высоких температурах, варьирование пористой структуры для изменения молекулярной сорбции на основе ситового эффекта. Другим подходом в модифицировании сорбентов для повышения сорбционных характеристик является увеличение активной поверхности сорбентов за счет внедрения в их структуру углеродных нанотру-

бок (УНТ), которые имеют уникальные физико-механические характеристики, обладают способностью поглощать различные вещества, что позволяет повысить сорбционную емкость сорбента. Наиболее эффективным способом внедрения УНТ является их выращивание, непосредственно, на всей поверхности сорбента. Несмотря на достоинства данного метода, он имеет некоторые недостатки: при их выращивании на поверхности сорбента заполняется часть пор исходного материала, что снижает сорбционный объем пор; в процессах эксплуатации сорбента возможно вымывание частиц, выращенных нанотрубок, а также нахождение остатков катализатора внутри модифицированного сорбента [9, 10]. Другой способ модифицирования – приготовление многокомпонентной смеси нано- и микродисперсных сыпучих материалов, содержащей цеолит, связующее и УНТ, которая формируется и термообрабатывается. Данный способ отличается простотой и возможностью дальнейшего масштабирования [11].

В качестве связующего использовалась бентонитовая глина, являющаяся сорбентом, а в качестве углеродных нанотрубок – УНТ серии «Таунит». Их использование предполагало повышение удельной поверхности материала, сорбционной емкости и селективности, то есть ключевых свойств разрабатываемого сорбента. Исходя из того что, как правило, количество связующего в подобных сорбентах колеблется в диапазоне 10 – 30 % от основного компонента, а также что внесение более 3 % УНТ экономически нецелесообразно, исследовано содержание связующего в образцах, %: 10, 20, 30, а УНТ – 0 – 3 %.

Исследование характеристик модифицированного цеолита проводилось в два этапа. Первый этап направлен на определение влияния связующего и УНТ на сорбционную способность модифицированного сорбента с целью определения их оптимального количества в составе конечного материала. Влияние компонентов на сорбционную емкость сорбента проверялось фотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ5400В. После подбора оптимального состава модифицированного сорбента – на втором этапе исследования – проведено математическое моделирование с построением изотерм сорбции для оценки полученных на предыдущем этапе экспериментальных данных, позволившее уточнить природу процессов, протекающих в модифицированных сорбентах.

На первом этапе исследований экспериментально установлено, что целесообразно использование для модифицирования смеси на основе цеолита марки СаА и NaX с содержанием связующего 20 %, 30 %, УНМ – 2,5 % и 2 %. Все эксперименты повторялись три раза, и приводились их усредненные значения. Исследование сорбционной емкости определенных ранее образцов модифицированных цеолитов осуществлялось по толуолу. В качестве сорбатива использовался толуол с чистотой более 99 %, разбавленный с использованием деионизированной воды до требуемых концентраций. Для оценки полученных экспериментальных данных, проведено математическое моделирование с построением изотерм сорбции, позволившее уточнить природу процессов, протекающих в модифицированных сорбентах. Исходные данные для построения изотерм: $m = 0,4$ г; $V = 50$ мл (0,125 л/г):

$$C_{\text{сорб}} = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{рав}})V}{m}, \quad (1)$$

где $C_{\text{сорб}}$, $C_{\text{исх}}$, $C_{\text{рав}}$ – емкости сорбента соответственно сорбционная, исходная и равновесная, мг/г;

$$K_{\text{распр}} = \frac{C_{\text{сорб}}}{C_{\text{рав}}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{распр}}$ – коэффициент распределения, л/г.

Коэффициенты распределения между твердой и жидкими фазами достаточно малы (0,003...0,010 л/г, минимум $K_{распр}$ – при 0,5 % УНТ, максимум $K_{распр}$ – при 2 % УНТ). Сорбция на границе раздела «твердое тело – раствор» обычно описывается четырьмя основными этапами [12]: внешний массоперенос, пленочная диффузия, внутренний массоперенос и взаимодействие адсорбата с активными центрами. Один или несколько из этих этапов могут оказывать решающую роль. При этом некоторые авторы считают, что только внутричастичная диффузия регулирует кинетику сорбции [15, 16].

В отличие от сорбции тяжелых металлов, при сорбции УНТ $K_{распр}$ сначала возрастает, а при достижении значения 0,010 л/г убывает, то есть насыщение сорбционных центров на поверхности сорбента СаА + 20 % Б происходит лишь при добавлении 2 % УНТ (максимальная емкость сорбента достигается при 2,5 % УНТ – 42,13 мг/г, при ней происходит максимальное насыщение сорбционных центров). Для анализа данных использованы следующие уравнения построения изотерм сорбции (рис. 1), где по оси X отложена концентрация сорбента c , мг·л⁻¹:

– уравнение Фрейндлиха (рис. 1, а):

$$C_{сорб} = K_F C_{равн}, \quad (3)$$

$$y = Kx^n, \quad (4)$$

где K_F – константа, описывающая распределение вещества (то есть в данном случае УНТ) между жидкой и твердой фазами при изменении его концентрации, л/г, представляет собой средневзвешенную емкость распределения $C_{распр}$; n – параметр (энергетическая константа), указывающий на гетерогенность сорбционных центров

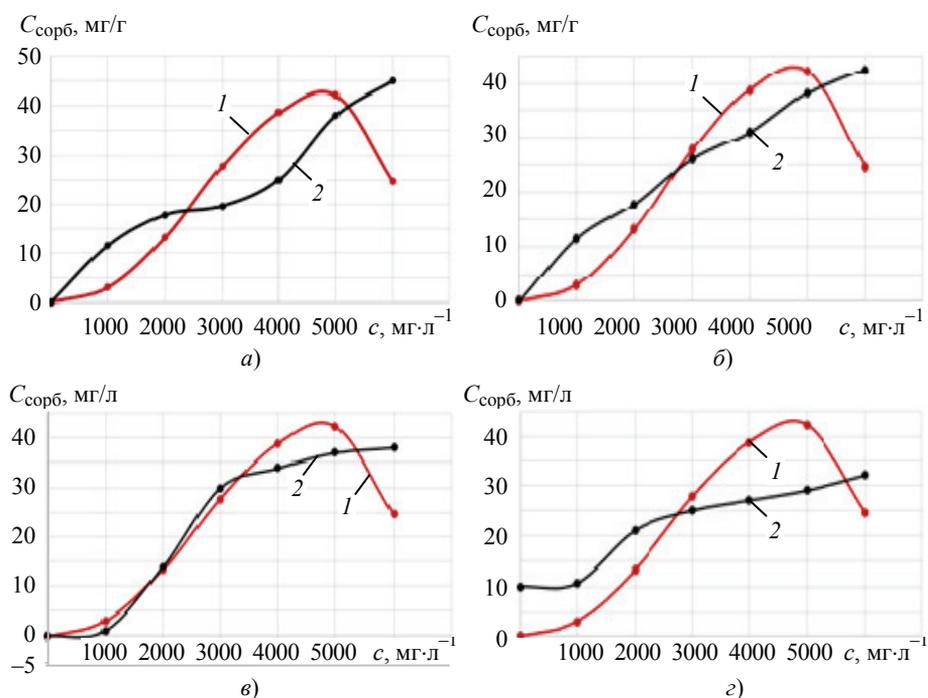


Рис. 1. Графики изотерм сорбции:

а, б – модели Фрейндлиха и Ленгмюра соответственно;
в, з – модели Ленгмюра–Фрейндлиха соответственно для одного и двух центров сорбции;
1 – модифицированный сорбент; 2 – модифицированный сорбент, рассчитанный по моделям

на поверхности сорбента: если $0 < n < 1$, то сорбционный процесс благоприятен (природа процесса – физическая), если n ближе к 0, то гетерогенность центров большая, а если ближе к 1 – центры более гомогенны.

$K_F = 0,08788$ л/г; $n = 0,6980$; центр сорбции $R^2 = 0,7228$; среднеквадратичная ошибка $RMSE = 9,543$.

Адсорбция благоприятная, сорбционные центры средней гомогенности.

K_F немного меньше максимального $K_{распр}$ ($0,0088 < K_{распр}$) и почти одного порядка с другими значениями. Несмотря на то, что $R^2 = 0,7228$, данная модель адекватно оценивает процесс физической сорбции с малым $K_{распр}$.

– уравнение Ленгмюра (рис. 1, б):

$$C_{сорб} = \frac{bK_L C_{равн}}{1 + K_L C_{равн}}; \quad (5)$$

$$y = \frac{bK_x}{1 + K_x}, \quad (6)$$

где K_L – константа, представляющая собой энергию связи адсорбента с сорбентом, л/мг; b – максимальная сорбционная емкость, мг/г.

$K_L = 0,0001678$ л/мг; $b = 73,7$ мг/г; $R^2 = 0,7553$; $RMSE = 8,966$.

Данная модель переоценивает максимальную сорбционную емкость ($b = 73,7 > 42,13$ мг/г), но указывает на малую энергию связи УНМ с сорбентом.

– уравнение Ленгмюра–Фрейндлиха для одного центра сорбции (рис. 1, в)

$$C_{сорб} = \frac{b(K_{L-F1} C_{равн})^n}{1 + (K_{L-F} C_{равн})^n}, \quad (7)$$

где K_{L-F} – энергия связи, л/мг; $n > 1$ – благоприятная сорбция.

$K_{L-F} = 0,0004566$ л/мг; $b = 35,05$; $n = 5,622$; $R^2 = 0,8806$; $RMSE = 7,001$.

Модель указывает на малую энергию связи и сорбционную емкость ($b = 35,05 < 42,13$ мг/г) и адекватно описывает процесс ($R^2 = 0,8806$).

– уравнение Ленгмюра–Фрейндлиха для двух центров сорбции (рис. 1, г)

$$C_{сорб} = \frac{b(K_{L-F1} C_{равн})^{n_1}}{1 + (K_{L-F1} C_{равн})^{n_1}} + \frac{b(K_{L-F2} C_{равн})^{n_2}}{1 + (K_{L-F2} C_{равн})^{n_2}}. \quad (8)$$

Индексы «1» и «2» – разные виды центров сорбции.

$K_{L-F1} = 0,0004249$ л/мг; $K_{L-F2} = 0,0009896$ л/мг; $b_1 = 24,89$; $b_2 = 20,27$; $n_1 = 2,262$; $n_2 = 7,0 \cdot 10^{-6}$; $R^2 = 0,7404$; $RMSE = 20,65$.

Модель указывает на однородность (гомогенность) центров сорбции (схожесть в порядке значений K_{L-F1} и K_{L-F2}). Сумма $b_1 + b_2 = 24,89 + 20,27$ мг/г почти совпадает с максимальной $C_{сорб}$.

Из всех рассмотренных моделей наиболее точную картину дает уравнение Ленгмюра–Фрейндлиха для одного вида центров сорбции ($R^2 = 0,8806$), далее – уравнение Ленгмюра ($R^2 = 0,7553$), Ленгмюра–Фрейндлиха для двух видов центров ($R^2 = 0,7404$) и уравнение Фрейндлиха ($R^2 = 0,7228$). Все уравнения дополняют друг друга по тому или иному параметру сорбции. Сорбция УНТ имеет физическую природу, энергия связи между нанотрубками и сорбентом весьма малая, сорбент имеет почти однородную поверхность (один сорбционный центр) [16, 17]. Максимальная сорбционная емкость сорбента тоже невелика, поэтому сорбционный максимум наблюдается только при 2,5 % УНТ, а максимальный коэффициент распределения при 2 % УНТ. Полученные в результате моделирова-

ния изотермы сорбции позволяют в первом приближении провести оценку процессов, протекающих в модифицированных сорбентах, установить их природу и определить наиболее адекватную модель, применимую в данном случае.

Проведенные исследования позволили установить промышленный сорбент для модифицирования и определить его оптимальный состав. Рассмотренная технология модифицирования отличается простотой и возможностью масштабирования, обеспечивая переход от лабораторных исследований к опытно-промышленному производству. Исследование сорбционных характеристик и математическое моделирование уточнили природу процессов, протекающих в модифицированных сорбентах. Из представленных данных видно, что значения сорбционной емкости модифицированного сорбента в целом сравнимы со значениями сорбционной емкости исходного материала. Полученные результаты показывают правильность и перспективность направления исследований. Данные результаты являются отправной точкой дальнейших комплексных исследований, направленных на разработку перспективных сорбирующих материалов нового поколения широкого спектра применения.

Список литературы

1. Enhancing Membrane Performance in Removal of Hazardous VOCs from Water by Modified Fluorinated PVDF Porous Material / S. Al-Gharabli, W. Kujawski, Z. A. El-Rub [et al.] // *Journal of Membrane Science*. – 2018. – Vol. 556. – P. 214 – 226. doi: 10.1016/j.memsci.2018.04.012
2. Chungsyng, Lu. Surface Modification of Carbon Nanotubes for Enhancing BTEX Adsorption from Aqueous Solutions / Lu. Chungsyng, Su. Fengsheng, Hu. Suhkai // *Applied Surface Science*. – 2008. – Vol. 254, No. 21. – P. 7035 – 7041. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.05.282
3. Enhanced Adsorption of Ionizable Aromatic Compounds on Humic Acid-Coated Carbonaceous Adsorbents / Y. B. Sun, C. L. Chen, D. D. Shao [et al.] // *RSC Advances*. – 2012. – No. 27. – P. 10359 – 10364. doi: 10.1039/C2RA21713A
4. Auta, M. Coalesced Chitosan Activated Carbon Composite for Batch and Fix-Bed Adsorption of Cationic and Anionic Dyes / M. Auta, B. H. Hameed // *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*. – 2013. – Vol. 105. – P. 199 – 206. doi: 10.1016/j.colsurfb.2012.12.021
5. Synthesis and Characterization of Green Porous Carbons with Large Surface Area by Two Step Chemical Activation with KOH / N. Sh. Nasri, M. Jibril, M. A. A. Zaini [et al.] // *Jurnal Teknologi*. – 2014. – Vol. 67, No. 4. – P. 25 – 28. doi: 10.11113/jt.v67.2787
6. Ruan, X. Preparation of Organobentonite by a Novel Semidry-Method and its Adsorption of 2,4-Dichlorophenol from Aqueous Solution / X. Ruan, H. Liu, C.-Y. Chang, X.-Y. Fan // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2014. – Vol. 95, Part A. – P. 212 – 218. doi: 10.1016/j.ibiod.2014.06.007
7. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойство, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
8. Adsorptive Removal of Toluene and Carbon Tetrachloride from Gas Phase Using Zeolitic Imidazolate Framework-8: Effects of Synthesis Method, Particle Size, and Pretreatment of the Adsorbent / S. Jafari, F. Ghorbani-Shahna, A. Bahrami, H. Kazemian // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2018. – Vol. 268. – P. 58 – 68. doi: 10.1016/j.micromeso.2018.04.013
9. Lillo-Ródenas, A. Behaviour of Activated Carbons with Different Pore Size Distributions and Surface Oxygen Groups for Benzene and Toluene Adsorption at Low Concentrations / A. Lillo-Ródenas, D. Cazorla-Amorós, A. Linares-Solano // *Carbon*. – 2005. – Vol. 43, No. 8. – P. 1758 – 1767. doi: 10.1016/j.carbon.2005.02.023

10. Fungal Biomass Composite with Bentonite Efficiency for Nickel and Zinc Adsorption: A Mechanistic Study / A. Rashid, H. N. Bhatti, M. Iqbal, S. Noreen // *Ecological Engineering*. – 2016. – Vol. 91. – P. 459 – 471. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.03.014
11. Попова, А. А. Особенности поведения движущегося слоя нанодисперсного материала и их учет при проектировании технологического оборудования / А. А. Попова, И. Н. Шубин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 323 – 335. doi:10.17277/ vestnik.2020.02.pp.323-335
12. Методика проектирования аппаратурного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе / А. В. Рухов, Д. В. Таров, Т. П. Дьячкова [и др.] // *Изв. высш. учебн. заведений. Серия: Химия и хим. технология*. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 94 – 101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959
13. Cong, Li. The Removal of Atrazine, Simazine, and Prometryn by Granular Activated Carbon in Aqueous Solution / Li Cong., Li Wang, Shen Yonggang // *Desalination and Water Treatment*. – 2014. – Vol. 52, No. 19-21. – P. 3510 – 3516. doi: 10.1080/19443994.2013.803650
14. McKay, G. Application of Surface Diffusion Model to the Adsorption of Dyes on Bagasse Pith / G. McKay // *Adsorption*. – 1998. – Vol. 4 (3-4). – P. 361 – 372. doi: 10.1023/A:1008854304933
15. Cook, D. The Application of Powdered Activated Carbon for MIB and Geosmin Removal: Predicting PAC Doses in Four Raw Waters / D. Cook, G. Newcombe, P. Sztajn bok // *Water Research*. – 2001. – Vol. 35, No. 5. – P. 1325 – 1333. doi: 10.1016/S0043-1354(00)00363-8
16. High-Performance Removal of Toxic Phenol by Single-Walled and Multi-Walled Carbon Nanotubes: Kinetics, Adsorption, Mechanism and Optimization Studies / M. H. Dehghani, M. Mostofi, M. Alimohammadi [et al.] // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2016. – Vol. 35. – P. 63 – 74. doi: 10.1016/j.jiec.2015.12.010
17. Попова, А. А. Использование CALS-технологий в машиностроении на примере разработки трехмерных моделей типовых изделий / А. А. Попова, И. Н. Шубин, Р. Э. Алиев // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 637 – 649. doi:10.17277/ vestnik.2020.04.pp.637-649

Technology for Modifying Sorbents Based on Zeolite with Carbon Nanotubes

A. A. Popova, I. N. Shubin

*Department of Equipment and Technology of Manufacturing Nanoproducts,
alyona.popova.93@list.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: modeling; modification; sorption; carbon nanotubes; zeolite.

Abstract: The technology of modification with carbon nanotubes of one of the most widespread industrial sorbents - zeolite of the CaA and NaX brands is proposed. The modification technology consisted in the preparation of a multicomponent mixture of nano- and microdispersed bulk materials containing zeolite, carbon nanotubes (CNTs) and, as a binder, bentonite clay. Then the resulting mixture was molded, dried and heat treated.

The optimal content of the binder (20 and 30 %) and carbon nanotubes (2.5 and 2 %) for the modified versions of the CaA + CNT and NaX + CNT zeolites, respectively, has been experimentally established. The sorption capacity of modified zeolites for toluene vapor has been determined.

References

1. Al-Gharabli S., Kujawski W., El-Rub Z.A., Hamad E.M., Kujawa J. Enhancing Membrane Performance in Removal of Hazardous VOCs from Water by Modified Fluorinated PVDF Porous Material, *Journal of Membrane Science*, 2018, vol. 556, pp. 214-226, doi: 10.1016/j.memsci.2018.04.012
2. Chungsyng Lu., Fengsheng Su., Suhkai Hu. Surface Modification of Carbon Nanotubes for Enhancing BTEX Adsorption from Aqueous Solutions, *Applied Surface Science*, 2008, vol. 254, no. 21, pp. 7035-7041, doi: 10.1016/j.apsusc.2008.05.282
3. Sun Y.B., Chen C.L., Shao D.D. [et al.] Enhanced Adsorption of Ionizable Aromatic Compounds on Humic Acid-Coated Carbonaceous Adsorbents, *RSC Advances*, 2012, no. 27, pp. 10359-10364, doi: 10.1039/C2RA21713A
4. Auta M., Hameed B.H. Coalesced Chitosan Activated Carbon Composite for Batch and Fix-Bed Adsorption of Cationic and Anionic Dyes, *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 2013, vol. 105, pp. 199-206, doi: 10.1016/j.colsurfb.2012.12.021
5. Nasri N.Sh., Jibril M., Zaini M.A.A., Mohsin R., Dadum H.U., Musa A.M. Synthesis and Characterization of Green Porous Carbons with Large Surface Area by Two Step Chemical Activation with KOH, *Jurnal Teknologi*, 2014, vol. 67, no. 4, pp. 25-28, doi: 10.11113/jt.v67.2787
6. Ruan X., Liu H., Chang C.-Y., Fan X.-Y. Preparation of Organobentonite by a Novel Semidry-Method and its Adsorption of 2,4-Edichlorophenol from Aqueous Solution, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, vol. 95, part A, pp. 212-218, doi: 10.1016/j.ibiod.2014.06.007
7. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystvo, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, property, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
8. Jafari S., Ghorbani-Shahna F., Bahrami A., Kazemian H. Adsorptive Removal of Toluene and Carbon Tetrachloride from Gas Phase Using Zeolitic Imidazolate Framework-8: Effects of Synthesis Method, Particle Size, and Pretreatment of the Adsorbent, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, vol. 268, pp. 58-68, doi: 10.1016/j.micromeso.2018.04.013
9. Lillo-Ródenas A., Cazorla-Amorós D., Linares-Solano A. Behaviour of Activated Carbons with Different Pore Size Distributions and Surface Oxygen Groups for Benzene and Toluene Adsorption at Low Concentrations, *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 8, pp. 1758-1767, doi: 10.1016/j.carbon.2005.02.023
10. Rashid A., Bhatti H.N., Iqbal M., Noreen S. Fungal Biomass Composite with Bentonite Efficiency for Nickel and Zinc Adsorption: A Mechanistic Study, *Ecological Engineering*, 2016, vol. 91, pp. 459-471, doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.03.014
11. Popova A.A., Shubin I.N. [Features of the behavior of a moving layer of nanodispersed material and their consideration in the design of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 323-335, doi: 10.17277/ vestnik.2020.02.pp.323-335 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Rukhov A.V., Tarov D.V., D'yachkova T.P., Orlova N.V., Shubin I.N., Tarov V.P. [Methodology for the design of hardware design for production of carbon nanotubes and intermediate products based on them], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94-101, doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Cong Li., Wang Li, Yonggang Shen The Removal of Atrazine, Simazine, and Prometryn by Granular Activated Carbon in Aqueous Solution, *Desalination and Water Treatment*, 2014, vol. 52, no. 19-21, pp. 3510-3516, doi: 10.1080/19443994.2013.803650
14. McKay G. Application of Surface Diffusion Model to the Adsorption of Dyes on Bagasse Pith, *Adsorption*, 1998, vol. 4 (3-4), pp. 361-372, doi: 10.1023/A:1008854304933

15. Cook D., Newcombe G., Sztajn bok P. The Application of Powdered Activated Carbon for MIB and Geosmin Removal: Predicting PAC Doses in Four Raw Waters, *Water Research*, 2001, vol. 35, no. 5, pp. 1325-1333, doi: 10.1016/S0043-1354(00)00363-8

16. Dehghani M.H., Mostofi M., Alimohammadi M. [et al.] High-Performance Removal of Toxic Phenol by Single-Walled and Multi-Walled Carbon Nanotubes: Kinetics, Adsorption, Mechanism and Optimization Studies, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, vol. 35, pp. 63-74, doi: 10.1016/j.jiec.2015.12.010

17. Popova A.A., Shubin I.N., Aliyev R.E. [The use of CALS-technologies in mechanical engineering on the example of the development of three-dimensional models of standard products], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 637-649, doi: 10.17277/ vestnik.2020.04.pp.637-649 (In Russ., abstract in Eng.)

Technologie der Modifizierung von Sorbenten mit Kohlenstoff-Nanoröhren auf Basis von Zeolit

Zusammenfassung: Es ist die Technologie der Modifikation mit Kohlenstoff-Nanoröhren eines der am weitesten verbreiteten industriellen Sorbenten - Zeolith der Marken CaA und NaX vorgeschlagen. Die Modifizierungstechnologie bestand in der Herstellung einer Mehrkomponentenmischung aus nano- und mikrodispersen Schüttgütern mit Zeolith, Carbon Nanoröhren (CNTs) und als Bindemittel Bentonitton. Dann wurde die resultierende Mischung geformt, getrocknet und wurde einer Wärmebehandlung unterzogen.

Der optimale Gehalt des Bindemittels ist experimentell festgestellt: (20 und 30 %) und der Kohlenstoffnanoröhren (2,5 und 2 %) jeweils für modifizierte Versionen von CaA + CNT bzw. NaX + CNT-Zeolithen. Es ist die Sorptionskapazität von modifizierten Zeolithen für Toluoldampf bestimmt.

Technologie de modification par nanotubes de carbone sorbants à base de zéolite

Résumé: Est Proposée la technologie de la modification par les nanotubes de carbone de l'un des plus courants sorbènes industriels - zéolite des classes CaA et NaX. La technologie de la modification consistait à préparer un mélange multi - composant de matériaux en vrac nano et microdispersés contenant de la zéolite, des nanotubes de carbone (NTC) et, en tant que liant, de l'argile bentonite. Ensuite, le mélange reçu a été formé, séché et a subi un traitement thermique.

Est établi expérimentalement le contenu optimal du liant (20 et 30 %) et des nanotubes de carbone (2,5 et 2 %) pour les variantes modifiées des zéolithes CaA + CNT et NaX + CNT, respectivement. Est déterminée la capacité de sorption des zéolithes modifiées par paires à partir de toluène.

Авторы: *Попова Елена Алексеевна* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Шубин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Дьячкова Татьяна Петровна* – доктор химических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
