



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 66.081.3

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11151

Анализ эффективности сорбционного удаления цинка из водных растворов нанокompозитом на основе оксида графена и углеродных нанотрубок

**Татьяна Сергеевна Кузнецова¹,
Александр Евгеньевич Бураков¹, Татьяна Владимировна Пасько¹,
Ирина Владимировна Буракова¹✉, Оксана Альбертовна Ананьева¹,
Анастасия Евгеньевна Меметова¹, Алексей Григорьевич Ткачев¹**

¹Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия, iris_tamb68@mail.ru✉

Аннотация. Современным подходом к решению задач экологической безопасности водных объектов является использование жидкофазных сорбционных методов, основанных на применении новых типов комплексных наноструктурированных адсорбентов. Углеродные наноматериалы и их модифицированные формы, обладающие уникальными физико-химическими и эксплуатационными характеристиками, позволяют обеспечить высочайшую эффективность очистки водных объектов. При этом наноматериалы могут обеспечить извлечение одновременно нескольких типов загрязнителей как органической, так и неорганической природы. Такое преимущество достигается за счет синергетического эффекта – развитой удельной поверхности наносорбентов наряду с возможностью химического модифицирования поверхности и привития широкого спектра активных функциональных групп. В работе проведены кинетические сорбционные исследования процесса извлечения ионов цинка Zn (II) синтезированными нанокompозитами. Данные материалы представляют собой сорбенты на основе восстановленного оксида графена и окисленных углеродных нанотрубок, модифицированных функциональным органическим компонентом – полианилином и фенолформальдегидной смолой. В работе оценивалось влияние режимных параметров получения нанокompозитов (карбонизация, метод сушки) на их сорбционную способность. Исследования проводились для аэрогелевой формы материалов, а также для карбонизированных аэрогеля и криогеля. Описание кинетики адсорбции проводилось с помощью следующих эмпирических моделей: псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка, модели Еловича. Механизм адсорбции цинка на полученных материалах исследовали с использованием диффузионных моделей – Морриса-Вебера (внутричастичная диффузия) и Бойда (пленочная диффузия). Результаты проведенных экспериментов показали, что за первые 10 мин была достигнута адсорбционная емкость аэрогеля, карбонизированного аэрогеля и карбонизированного криогеля – 200, 110, 178 мг/г, соответственно. Установлено, что поглощение осуществляется по смешанно-диффузионному механизму с вкладом химического взаимодействия между ионом металла и функциональными группами сорбента.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, оксид графена, полианилин, аэрогель, криогель, карбонизация, адсорбция, цинк, кинетика

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20074, <https://rscf.ru/project/22-13-20074>

Для цитирования: Кузнецова Т.С., Бураков А.Е., Пасько Т.В., Буракова И.В., Ананьева О.А., Меметова А.Е., Ткачев А.Г. Анализ эффективности сорбционного удаления цинка из водных растворов нанокompозитом на основе оксида графена и углеродных нанотрубок // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 2. С. 280-289. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11151>



Original article

Analysis of the efficiency of zinc sorption from aqueous solutions by nanocomposite based on graphene oxide and carbon nanotubes

Tatyana S. Kuznetsova¹, Alexander E. Burakov¹, Tatyana V. Pasko¹,
Irina V. Burakova¹✉, Oksana A. Ananyeva¹, Anastasia E. Memetova, Alexey G. Tkachev

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, iris_tamb68@mail.ru✉

Abstract. A modern approach to the solution of the problems of environmental safety of water bodies is the application of liquid-phase sorption methods based on the use of new types of complex nanostructured adsorbents. Carbon nanomaterials and their modified forms, which have unique physical, chemical and operational characteristics, provide the highest efficiency in water treatment. At the same time, nanomaterials can ensure the extraction of several types of pollutants, both organic and inorganic. This advantage is achieved due to the synergistic effect - the developed specific surface of nanosorbents along with the possibility of chemical modification of the surface and grafting a wide range of active functional groups. In this work, kinetic sorption studies of the extraction of Zn (II) zinc ions by synthesized nanocomposites were carried out. These materials are sorbents based on reduced graphene oxide and oxidized carbon nanotubes modified with a functional organic component, polyaniline, and phenol-formaldehyde resin. The influence of regime parameters of obtaining nanocomposites (carbonization, drying method) on their sorption capacity was evaluated. Studies were carried out for the aerogel materials, as well as for carbonized aerogel and cryogel. The adsorption kinetics was described using the following empirical models: pseudo-first order, pseudo-second order models, Elovich model. The mechanism of zinc adsorption on the obtained materials was studied using diffusion Weber-Morris (intraparticle diffusion) and Boyd (film diffusion) models. The results of the experiments showed that in the first 10 minutes the adsorption capacity of the aerogel, carbonized aerogel and carbonized cryogel was reached – 200, 110, and 178 mg/g, respectively. It has been established that the absorption is carried out according to the mixed-diffusion mechanism with the contribution of the chemical interaction between the metal ion and the functional groups of the sorbent.

Keywords: carbon nanotubes, graphene oxide, polyaniline, aerogel, cryogel, carbonization, adsorption, zinc, kinetics.

Acknowledgments: the study was supported by Russian Science Foundation grant (project No. 22-13-20074P, <https://rscf.ru/project/22-13-20074>).

For citation: Kuznetsova T.S., Burakov A.E., Pasko T.V., Burakova I.V., Ananyeva O.A., Memetova A.E., Tkachev A.G. Analysis of the efficiency of zinc sorption from aqueous solutions by nanocomposite based on graphene oxide and carbon nanotubes. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2023. 23(2): 280-289. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11151>

Введение

Растущее техногенное влияние современных промышленных предприятий и фабрик на качество и чистоту воды способствует активному росту исследований, посвященных эффективному удалению загрязнителей из водных сред с помощью адсорбционных методов [1, 2].

Опасными неорганическими загрязнителями водных сред являются тяжелые металлы – ртуть (Hg), кадмий (Cd), свинец (Pb), хром (Cr), цинк (Zn), медь (Cu), олово (Sn) и прочие. В частности, цинк

является жизненно важным микроэлементом, однако чрезмерное его потребление может привести к различным острым и хроническим побочным эффектам [3-5]. Предельно допустимая концентрация цинка в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения составляет 1.0 мг/дм³ [6], в питьевой воде 5.0 мг/дм³ [7]. Очистка водных сред от ионов тяжелых металлов осуществляется рядом методов: мембранная фильтрация, ионный обмен, адсорбция, химическое осаждение, обратный осмос [4, 8]. Одним из наиболее эффективных является ад-

сорбция, в частности, на наноструктурированных материалах (оксид графена (ОГ), углеродные нанотрубки (УНТ) и др.) [4, 9-11]. В частности, УНТ, благодаря высокоразвитой поверхности, низкой массовой плотности, наличию эффективной пористости и простоте модифицирования, широко используются для удаления различных тяжелых металлов [2]. При этом увеличение доступности и функциональности поверхности УНТ достигается, например, посредством окисления.

Существует ряд проблем, которые ограничивают применимость наноматериалов. Довольно серьезной проблемой при использовании графена в качестве адсорбента является его склонность к агрегации и переукладке графеновых листов из-за ван-дер-ваальсовых сил между ними. Одним из способов решения данной проблемы считается создание упорядоченной пористой структуры, а именно, каркасных композитов с помощью сверхкритической сушки и лиофилизации. Данные материалы не только имеют большую удельную поверхность, но и сочетают различные функциональные свойства всех компонентов композита [4, 12-15]. Например, для очистки воды от ионов цинка Zn^{2+} использовали коммерческие одностенные и многостенные УНТ [16]. Для придания гидрофильности УНТ были термообработаны при $350^{\circ}C$ в течение 30 минут, очищены 70%-ым раствором гипохлорита натрия, и подвергнуты ультразвуковой очистке в течение 20 минут на водяной бане (при $85^{\circ}C$). Адсорбционная емкость по Zn^{2+} составила 43.66 мг/г. В работах [5, 17] исследована сорбция ионов цинка Zn^{2+} на углеродных аэрогелях. Также довольно часто углеродные аэрогели проходят дополнительный этап обработки – карбонизацию [14, 18, 19].

В настоящей статье проведены кинетические исследования сорбции ионов цинка из модельных растворов на нано-

композитных материалах, матрицей которых являются УНТ и ОГ, модифицированные полианилином (ПАНИ) и фенолформальдегидной смолой (ФФС). Также авторами осуществлялась оценка влияния способов сушки на сорбционную способность материалов.

Экспериментальная часть

Для синтеза нанокompозитных материалов применялись приборы, материалы и реактивы, аналогичные работе [15]. Предварительно получены нанокompозитные гидрогели на основе восстановленного оксида графена (в-ОГ) и окисленных углеродных нанотрубок (о-УНТ), модифицированных функциональным органическим компонентом – полианилином и фенолформальдегидной смолой [15]. Все графеновые наноматериалы в окисленной и восстановленной форме были приобретены в ООО «НаноТех-Центр», г. Тамбов. Окисленные УНТ (с массовым содержанием 11.48% сухого вещества) получены путем окисления раствором гипохлорита натрия многостенных УНТ марки «Таунит - М» (внешний диаметр – 10-20 нм, внутренний диаметр – 5-15 нм, ориентация графеновых слоев - цилиндрическая). в-ОГ (с массовым содержанием 2,42% сухого вещества) получен путем восстановления аскорбиновой кислотой 1% суспензии ОГ. Согласно открытым данным на сайте организации, данная водная дисперсия ОГ производится в промышленных масштабах по модифицированной методике Хаммерса [20]. Технология запатентована (патент РФ № 2709594 «Способ получения оксида графена» [21]). В указанной работе были получены четыре формы образцов – аэрогель, полученный по технологии сверхкритических флюидов (АС); аэрогель, полученный лиофильной

Таблица 1. Оценка параметров пористого пространства рассматриваемых композитов
 Table 1. Estimation of the nanocomposites porous space parameters.

Нанокompозит	Удельная поверхность материала (BET), м ² /г	Удельная поверхность (DFT), м ² /г	Объем пор (DFT), см ³ /г	Размер пор (DFT), нм
АС	290	189	0.314	1.410
АСК	315	245	0.768	1.126
АЛК	290	238	0.324	1.126

сушкой (АЛ); карбонизированный аэрогель (АСК) и карбонизированный криогель (АЛК). В таблице 1 приведены параметры пористой структуры рассматриваемых в работе композитов.

Для проведения кинетики сорбции ионов цинка готовили модельный раствор $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ с начальной концентрацией 100 мг/дм³ в буфере с рН=6. Эксперименты проводили в статических условиях: в 30 см³ раствора нитрата цинка добавляли 0.01 г сорбента, для лучшего контакта фаз пробирки помещали в программируемый ротатор (Multi-Rotator BioSan) для перемешивания со скоростью вращения 120 об/мин. Время контакта варьировалось от 2 до 60 мин. После раствор фильтровали для отделения твердой фазы и определяли конечную концентрацию ионов цинка с помощью энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии (спектрометр ARLQuant ThermoScientific, ThermoScientific, США).

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлено влияние времени контакта на сорбционную емкость ионов Zn^{2+} для всех исследуемых адсорбентов. Равновесное время достигается через 10 мин. Следует отметить, что характер протекания сорбции – стремительный, за первые 10 мин достигается равновесие в системе «сорбат-сорбент» и кинетическая кривая выходит на плато. Из всех рассматриваемых нанокompозитов наиболее эффективным оказался аэрогель.

В данной работе обработка массива кинетических экспериментальных данных проводилась с использованием моделей адсорбции, таких как псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и Еловича.

Кинетическая модель псевдо-первого и второго порядков выражается с помощью формул (1) и (2), соответственно [22, 23]:

$$q_t = q_e (1 - \exp(-k_1 t)) \quad (1)$$

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (2)$$

Кинетическая модель Еловича выражается с помощью уравнения [24]:

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t) \quad (3)$$

где q_e – количество ионов Zn^{2+} , адсорбированного при равновесном времени t (мг/г); q_t – количество ионов Zn^{2+} , адсорбированного в момент времени t (мг/г); k_1 – константа скорости адсорбции псевдо-первого порядка (мин⁻¹); k_2 – константа скорости адсорбции псевдо-второго порядка (г·(мг·мин)⁻¹); α (г/мг) и β (мг/г·мин) – константы уравнения Еловича.

Обработка вышеуказанными моделями экспериментальных кинетических результатов показана на рис. 1. На основании этих результатов были определены расчетные кинетические параметры адсорбции ионов Zn^{2+} на АС, АСК и АЛК, которые представлены в табл. 2. Из полученных результатов можно сделать вывод, что модель кинетики псевдо-первого порядка дает самые высокие значения коэффициента корреляции R^2 (0.9965-

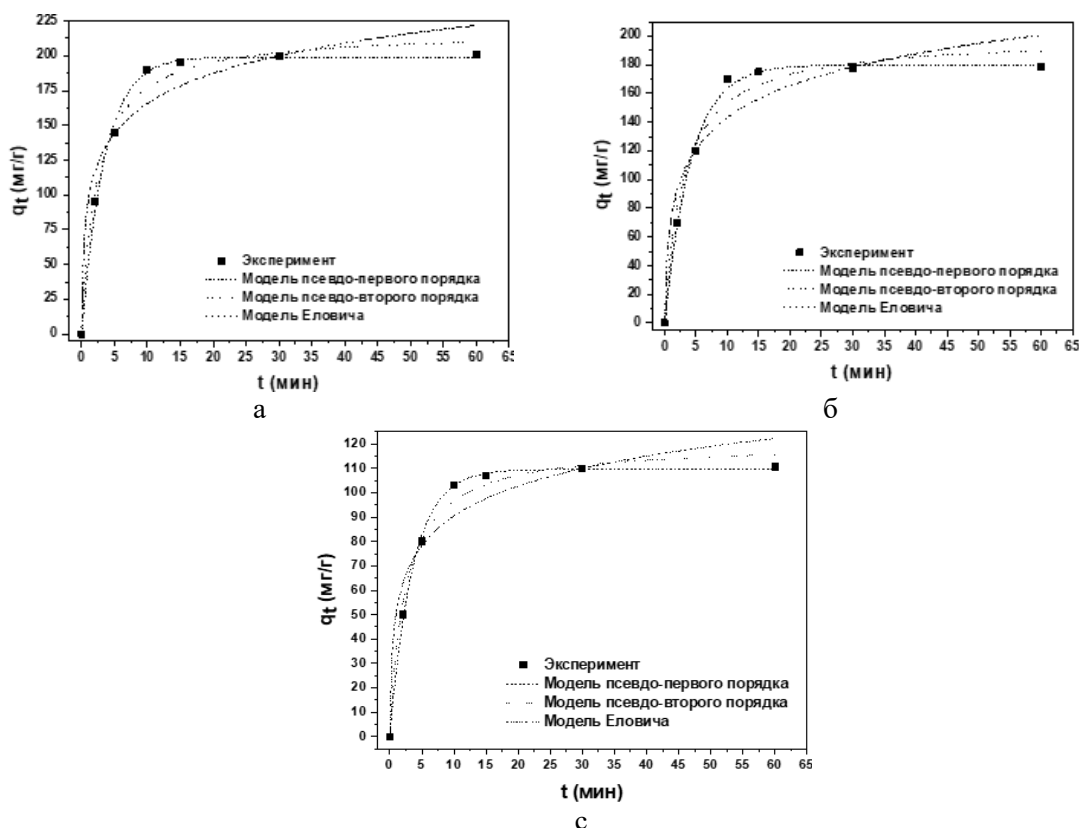


Рис. 1. Графическое представление моделей псевдопервого, псевдовторого порядка и Еловича процесса адсорбции ионов Zn^{2+} на АС (а), АСК (б) и АЛК (с)
 Fig. 1. Graphical representation of the pseudo-first, pseudo-second order and Elovich models of the adsorption process of Zn^{2+} ions on AS (a), ASC (b) and ALK (c)

Таблица 2. Значения кинетических параметров адсорбции ионов Zn (II)
 Table 2. The values of the kinetic parameters of the adsorption of Zn (II) ions

Материал	Эксперимент	Модель псевдо-первого порядка			Модель псевдо-второго порядка			Модель Еловича		
		q_e	k_1	R^2	k_2	q_e	R^2	β	α	R^2
АС	~200	0.290	199.2	0.9965	0.002	218.1	0.9899	0.031	$6.14 \cdot 10^2$	0.9492
АСК	~178	0.239	179.8	0.9971	0.002	199.2	0.9788	0.030	$2.69 \cdot 10^2$	0.9277
АЛК	~110	0.280	109.5	0.9983	0.003	120.2	0.9906	0.056	$1.07 \cdot 10^2$	0.9484

0.9983) для всех исследуемых материалов. Кроме того, отклонения между экспериментальными и расчетными значениями (q_e) по уравнению кинетики псевдо-первого порядка по сравнению с моделью псевдо-второго порядка, минимальные (менее 1%). Следовательно, модель псевдо-первого порядка может быть использована для описания кинетики адсорбции ионов Zn^{2+} на рассматриваемых материалах.

Механизм адсорбции ионов Zn^{2+} на трех полученных адсорбентах также изучали с помощью диффузионных моделей, таких как Морриса-Вебера (внутричастичная диффузия) и Бойда (пленочная диффузия).

Диффузионные модели Морриса-Вебера и Бойда выражаются с помощью формул (4) и (5), соответственно [25, 26]:

$$q_t = k_{id} \cdot t^{1/2} + C \quad (4)$$

$$F = 1 - \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp(-Bt) \quad (5)$$

Таблица 3. Значения параметров диффузионных моделей
 Table 3. Parameter values of diffusion models

Материал	Модель Морриса-Вебера			Модель Бойда
	k_{id}	C	R ²	R ²
АС	54.22	20.19	0.9958	0.9627
АСК	57.13	9.75	0.9988	0.9737
АЛК	30.20	9.08	0.9918	0.9818

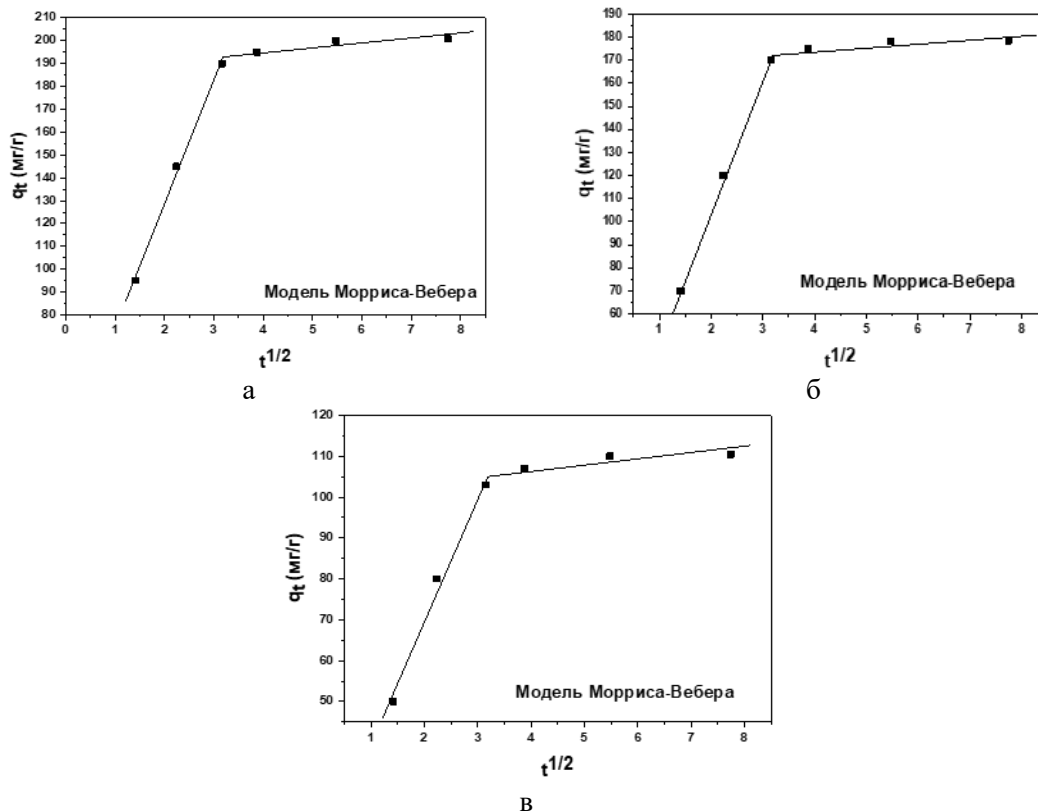


Рис. 2. Графики модели Морриса-Вебера для адсорбции ионов Zn²⁺ на АС (а), АСК (б) и АЛК (в)

Fig. 2. Graphs of the Weber-Morris model for the adsorption process of Zn²⁺ ions on AS (a), ASC (b) and ALC (c)

$$B_t = 0.4977 - \ln(1 - q_t/q_e) \quad (6)$$

где k_{id} – константа скорости внутричастичной диффузии (мг/г мин^{-1/2}); C – параметр, связанный с толщиной пограничного слоя (мг/г); F – доля вещества, адсорбированного в разное время t (мг/г); Bt – функция F .

Модель внутричастичной диффузии сформулирована на основе модели Вебера и Морриса и используется для определения стадии, ограничивающей скорость процесса адсорбции (табл. 3). Как правило, вещества, присутствующие в

растворе, адсорбируются путем массопереноса. Как правило, вещества, присутствующие в растворе, адсорбируются путем массопереноса - поверхностная, пленочная диффузия и диффузия через поры.

Хорошо известно, что если графики зависимости q_t от $t^{1/2}$ являются линейными и проходят через начало координат, то диффузия внутри частиц является стадией, контролирующей скорость [25]. На рис. 2 показаны графики модели Вебера и Морриса из которых видно, что для всех полученных адсорбентов они являются

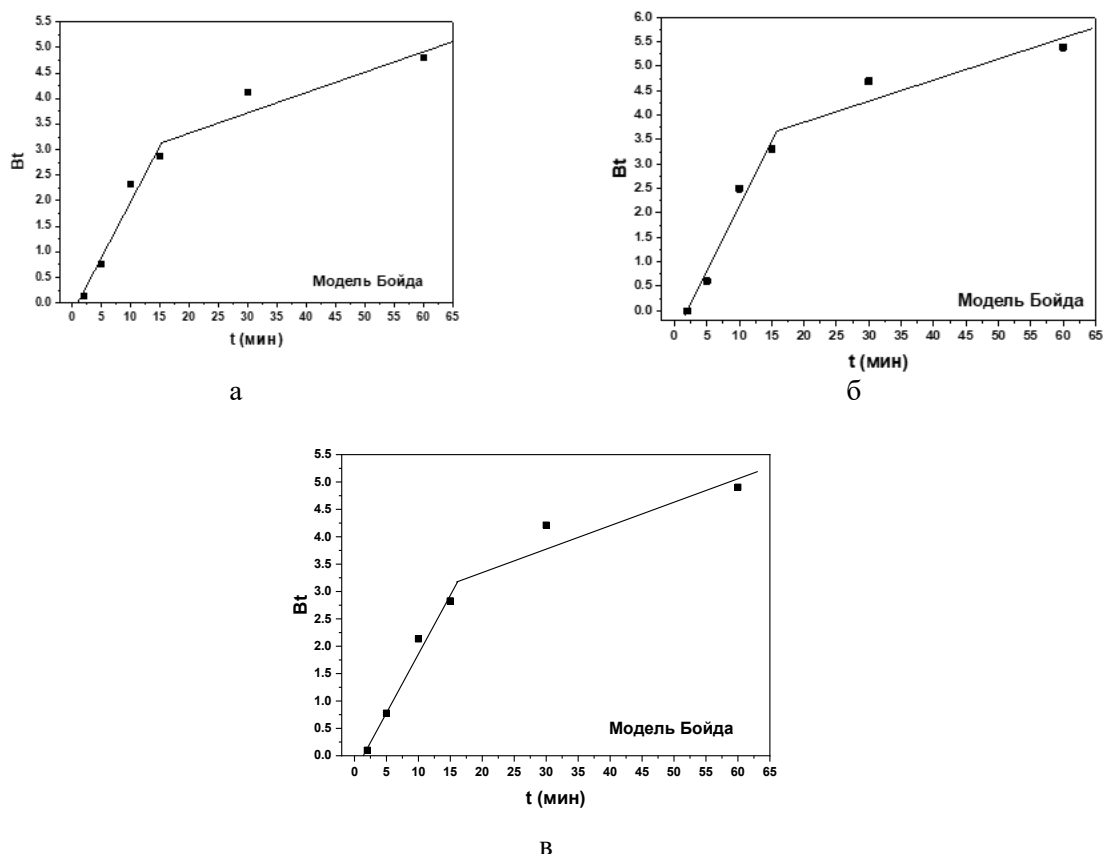


Рис. 3. Графики модели Бойда для адсорбции ионов Zn^{2+} на АС (а), АСК (б) и АЛК (в)
 Fig. 3. Graphs of the Boyd model for the adsorption process of Zn^{2+} ions on AS (a), ASC (b) and ALC (c)

билинейными (т. е. сорбция Zn^{2+} сопровождается двумя отдельными стадиями). Первая более резкая ступень связана с диффузией ионов Zn^{2+} в пограничном слое. Вторая ступень соответствует стадии конечного равновесия. Кроме того, первый линейный участок не проходит через начало координат для всех полученных адсорбентов ($C > 0$; $R^2 > 0.99$; табл. 2). Самое большое значение C наблюдалось на АС, указывающее на высокую начальную сорбцию Zn^{2+} с диффузией через раствор на внешнюю поверхность адсорбента через толстый пограничный слой.

Модель Бойда используется для понимания является ли пленочная диффузия шагом, контролирующим скорость процесса адсорбции. Бойд пришел к выводу, что внешняя поверхность вокруг адсорбента оказывает большое влияние на диффузию адсорбата [26]. Согласно этой модели, поровая диффузия контролирует

перенос массы, когда график является линейным и проходит через начало координат. На рис. 3 показаны графики модели Бойда для адсорбции Zn^{2+} на всех исследуемых адсорбентах.

Из рисунка 3 можно сделать вывод, что графики для всех исследуемых материалов не проходят через начало координат. Поэтому скорость контролируется пленочной диффузией или химической реакцией.

Закключение

В работе проведено кинетическое исследование процесса извлечения ионов цинка на гибридных нанокompозитных материалах, синтезированных на основе о-УНТ и в-ОГ, модифицированных ПАНИ и ФФС. Также проведена оценка влияния методов сушки на сорбционную способность указанных материалов. В результате статических кинетических исследований выявлено, что равновесное



время сорбции для каждого материала составило 10 мин. Установлено, что кинетика сорбции по всем материалам удовлетворительно описывается моделью псевдо-первого порядка, отвечающей за «сорбат-сорбент» взаимодействие. Адсорбционная емкость для АС составила 200 мг/г, АСК – 178 мг/г, АЛК – 110 мг/г. При оценке вклада диффузии в общую скорость процесса установлено, что процесс поглощения имеет смешанно-диф-

фузионный характер. При этом предположительно скорость адсорбции контролируется пленочной диффузией.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Mukhin V.M., Burakova I.V., Burakov A.E. Active carbon as nanoporous material for solving environmental problems. *Advanced Materials & Technologies*. 2017; 2: 50-56. <https://doi.org/10.17277/amt.2017.02.pp.050-056>
2. Rajendran S., Priya A.K., Kumar P. S., Hoang T.K.A., Sekar K., Chong K.Y., Khoo K.S., Ng H.S., Show P.L. A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater-A review. *Chemosphere*. 2022; 303(2): 135146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135146>
3. Scherz H., Kirchhoff E. Trace elements in foods: Zinc contents of raw foods – A comparison of data originating from different geographical regions of the world. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2006; 19(5): 420-433. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.10.004>
4. Torres C.E.I, Quezada T.E.S., Kharissova O.V., Kharisov B.I., Gomez M.I. Carbon-based aerogels and xerogels: Synthesis, properties, oil sorption capacities, and DFT simulations. *J. Environ. Chem. Eng*. 2021; 9(1): 104886. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104886>
5. Meena A.K., Mishra G.K., Rai P.K., Pajagopal C., Nagar P.N. Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using carbon aerogel as an adsorbent. *J. Hazard. Mater*. 2005; 122(1-2): 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.024>
6. Tsink v stochnykh vodakh. Available at: <https://nortest.pro/stati/voda/cink-v-stochnyh-vodah.html> (accessed 1 December 2022).
7. Sanitarnye pravila i normy SanPiN1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredey obitaniya». Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115#6540IN> (accessed 1 December 2022).
8. Godwin P.M., Pan Y., Xiao H., Afzal M.T. Progress in preparation and application of modified biochar for improving heavy metal ion removal from wastewater. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2019; 4(1): 31-42. <https://doi.org/10.21967/jbb.v4i1.180>
9. Qian H., Wang J., Yan L. Synthesis of lignin-poly(N-methylaniline)-reduced graphene oxide hydrogel for organic dye and lead ions removal. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2020; 5(3): 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.006>
10. Burakov A.E., Galunin E.V., Burakova I.V., Kucherova A.E., Agarwal S., Tkachev A.G., Gupta V.K. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. *Ecotoxicol. Environ. Saf*. 2018; 148: 702-712. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.034>
11. Adel M., Ahmed M.A., Elabiad M.A., Mohamed A.A. Removal of heavy metals and dyes from wastewater using graphene oxide-based nanomaterials: A critical review. *Environmental Nanotechnology*,



- Monitoring and Management*. 2022; 18: 100719.
<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100719>
12. Huo P., Xing G., Tian L., Zhang G., Wang H., Yu C., Li Y., Wu Z. Hollow carbon spheres/graphene hybrid aerogels as high-performance adsorbents for organic pollution. *Sep. Purif. Technol.* 2019; 213: 524-532. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.032>
13. Deshwal N., Singh M.B., Bahadur I., Kaushik N., Kaushik N.K., Singh P., Kurami K. A review on recent advancements on removal of harmful metal/metal ions using graphene oxide: Experimental and theoretical approaches. *Sci. Total Environ.* 2023; 858: 159672. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159672>
14. Pinelli F., Piras C., Rossi F. A perspective on graphene based aerogels and their environmental applications. *FlatChem*. 2022; 36: 100449. <https://doi.org/10.1016/j.flatc.2022.100449>
15. Kuznetsova T.S., Burakova I.V., Pasko T.V., Burakov A.E., Melezhik A.V., Mkrtychyan E.S., Babkin A.V., Neskornaya E.A., Tkachev A.G. Technology of nanocomposites preparation for sorption purification of aqueous media. *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2022; 16(2): 434-441. <https://doi.org/10.1134/S2075113322020447>
16. Lu C., Chiu H. Adsorption of zinc(II) from water with purified carbon nanotubes. *Chem. Eng. Sci.* 2006; 61(4): 1138-1145. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.08.007>
17. Gan G., Li X., Fan S., Wang L., Qin M., Yin Z., Chen G. Carbon Aerogels for Environmental Clean-Up. *Eur. J. Inorg. Chem.* 2019; 2019(27): 3126-3141. <https://doi.org/10.1002/ejic.201801512>
18. Maleki H. Recent advances in aerogels for environmental remediation applications: A review. *Chem. Eng. J.* 2016; 300: 98-118. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.098>
19. Lee J-H., Park S-J. Recent advances in preparations and applications of carbon aerogels: A review. *Carbon*. 2020; 163: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.02.073>
20. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of American Chemical Society*. 1958; 80(6): 1339. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
21. Tkachev A.G., Melezhik A.V., Osipov A.A., Tkachev M.A. Patent RF, no. 2709594, 2019.
22. Lagergren S. About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Sven. Vetenskapsakad. Handlingar*. 1898; 24: 1-39.
23. Ho Y., McKay G. The sorption of lead (II) ions on peat. *Water Research*. 1999; 33(2): 578-584.
24. McLintock I. The Elovich equation in chemisorption kinetics. *Nature*. 1967; 216(5121): 1204.
25. Weber W., Morris J. Intraparticle diffusion during the sorption of surfactants onto activated carbon. *Journal of the Sanitary Engineering Division*. 1963; 89(1): 53-61.
26. Boyd G.E., Adamson A.W., Myers Jr L.S. The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites, II: Kinetics. *Journal of the American Chemical Society*. 1947; 69: 2836-2848.

Информация об авторах / Information about the authors

Т.С. Кузнецова – к.т.н., ассистент кафедры Техника и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

А.Е. Бураков – к.т.н., доцент кафедры Техника и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

T.S. Kuznetsova – Ph.D., Assistant of the Department of Equipment and Technologies of Nanoproducs Production, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, E-mail: kuznetsova-t-s@yandex.ru

A.E. Burakov – Ph.D., Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Nanoproducs Production, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, E-mail: m-alex1983@yandex.ru



Т.В. Пасько – к.т.н., доцент кафедры Техника и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

И.В. Буракова – к.т.н., доцент кафедры Техника и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

О.А. Ананьева – магистрант, Техника и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

А.Е. Меметова – к.т.н., доцент кафедры Техника и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

А.Г. Ткачев – д.т.н., профессор, кафедры Техника и технологии производства нанопродуктов, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

T.V. Pasko – Ph.D., Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Nanoproductions Production, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, E-mail: tpasko@yandex.ru

I.V. Burakova – Ph.D., Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Nanoproductions Production, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, E-mail: iris_tamb68@mail.ru

O.A. Ananyeva – Master's Degree Student of the Department of Equipment and Technologies of Nanoproductions Production, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, E-mail: oksana.a9993471@gmail.com

A.E. Memetova – Ph.D., Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Nanoproductions Production, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, E-mail: anastasia.90k@mail.ru

A.G. Tkachev – D. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Equipment and Technologies of Nanoproductions Production, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, E-mail: nanotam@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29.12.2022; одобрена после рецензирования 04.04.2023; принята к публикации 05.04.2023.

The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 04.04.2023; accepted for publication 05.04.2023.