



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 9–15  
*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 9–15  
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-9-15>

Научная статья  
УДК 541.183

## Физико-химические свойства композитных сорбентов на основе бентонита, модифицированного пиролизным углеродом в условиях низкотемпературной каталитической карбонизации



А. С. Лосева , Д. Н. Комов, А. П. Ламихова, И. А. Казаринов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Лосева Анна Сергеевна, аспирант кафедры физической химии Института химии, [pymo4ka@gmail.com](mailto:pymo4ka@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1830-5748>

Комов Дмитрий Николаевич, магистрант кафедры физической химии Института химии, [omov-dnik@yandex.ru](mailto:omov-dnik@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6532-9534>

Ламихова Анна Павловна, магистрант кафедры физической химии Института химии, [mireidrei@mail.ru](mailto:mireidrei@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2596-4725>

Казаринов Иван Алексеевич, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физической химии Института химии, [kazarinovia@mail.ru](mailto:kazarinovia@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4858-9614>

**Аннотация.** Исследованы структурные и сорбционные свойства композитных сорбентов на основе природного бентонита, модифицированных соединениями углерода. Модифицирование исходного бентонита низкотемпературным (650°C) пиролизом сахарозы в присутствии солей металлов подгруппы железа приводит к существенному повышению удельной поверхности композитных сорбентов (до 275 м<sup>2</sup>/г), что обусловлено низкотемпературной каталитической графитизацией образующейся в процессе пиролиза углеродной фракции. Изучена сорбционная способность исследуемых наноструктурных композитных сорбентов по отношению к ионам никеля (II) и свинца (II). Наиболее высокие значения предельной адсорбции ионов никеля (II) и свинца (II) в нейтральных растворах (30–86 мг/г) были получены на композитных сорбентах, в которых введенный углерод претерпевал стадию низкотемпературной каталитической графитизации. Пиролизический способ введения углерода с одновременной его каталитической графитизацией в композитные сорбенты на основе бентонита является перспективным для дальнейшего совершенствования сорбентов на основе природных алюмосиликатов.

**Ключевые слова:** бентонит, композитный сорбент, адсорбция, удельная поверхность, каталитическая графитизация

**Для цитирования:** Лосева А. С., Комов Д. Н., Ламихова А. П., Казаринов И. А. Физико-химические свойства композитных сорбентов на основе бентонита, модифицированного пиролизным углеродом в условиях низкотемпературной каталитической карбонизации // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2022. Т. 22, вып. 1. С. 9–15. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-9-15>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### The study of the physico-chemical properties of bentonite-based composite sorbents modified with carbon under the conditions of catalytic carbonization

A. S. Loseva , D. N. Komov, A. P. Lamikhova, I. A. Kazarinov

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Anna S. Loseva, [pymo4ka@gmail.com](mailto:pymo4ka@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1830-5748>

Dmitry N. Komov, [omov-dnik@yandex.ru](mailto:omov-dnik@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6532-9534>

Anna P. Lamikhova, [mireidrei@mail.ru](mailto:mireidrei@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2596-4725>

Ivan A. Kazarinov, [kazarinovia@mail.ru](mailto:kazarinovia@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4858-9614>

**Abstract.** The structural and sorption properties of composite sorbents based on natural bentonite modified with carbon compounds have been investigated. Modification of the initial bentonite by low-temperature (650°C) pyrolysis of sucrose in the presence of metal salts of the iron subgroup leads to a significant increase in the specific surface area of composite sorbents (up to 275 m<sup>2</sup>/g), this is due



to low-temperature catalytic graphitization of the carbon fraction formed during pyrolysis. The sorption capacity of the investigated nanostructured composite sorbents with respect to nickel (II) and lead (II) ions has been studied. The highest values of the limiting adsorption of nickel (II) and lead (II) ions in neutral solutions (30–86 mg/g) were obtained on composite sorbents in which the introduced carbon underwent a stage of low-temperature catalytic graphitization. The pyrolytic method of introducing carbon with its simultaneous catalytic graphitization into composite sorbents based on bentonite is promising for the further improvement of sorbents based on natural aluminosilicates.

**Keywords:** bentonite, composite sorbent, adsorption, specific surface area, catalytic graphitization

**For citation:** Loseva A. S., Komov D. N., Lamikhova A. P., Kazarinov I. A. The study of the physico-chemical properties of bentonite-based composite sorbents modified with carbon under the conditions of catalytic carbonization. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2022, vol. 22, iss. 1, pp. 9–15 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2022-22-1-9-15>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Углеродные наноструктурные сорбенты на основе дисперсных алюмосиликатов и глин, модифицированных продуктами термического разложения различных органических прекурсоров, находят, наряду с активированными углями, все более широкое практическое применение [1–6]. Такие карбонизированные, или науглероженные, природные или искусственные материалы используются, например, при очистке жидких сред от органических веществ, катионов различных металлов, микроорганизмов, а также для других целей. Возможность использования углеродных наносорбентов на основе глин как высокоэффективных сорбентов и катализаторов обуславливает высокую научно-практическую заинтересованность в исследованиях таких материалов. Это относится и к изучению физико-химических свойств наноглесицикатных сорбентов, в частности, к исследованиям структурных особенностей и связанной с ними способности поглощать из жидких сред различные загрязняющие вещества. Поскольку углеродные наносорбенты на основе глин получают путем модифицирования поверхности высокодисперсных глинистых минералов продуктами разложения органических прекурсоров [4], то возможно управление свойствами получаемых нанопористых материалов за счет как особенностей глинистой матрицы, так и процесса термического разложения органического прекурсора. При этом можно регулировать физико-химические, в частности структурные, характеристики углеродных материалов, которые зависят от условий термического разложения прекурсора в реакционной смеси. Каталитические свойства поверхности алюмосиликатов также существенно влияют на структуру нанопористых углесицикатных сорбентов. В результате термической обработки в присутствии кислорода могут быть получены нанопористые материалы с высокими сорбционными свойствами [7]. При модифицировании алюмосиликатов продуктами термического разложения органических пре-

курсоров пористая структура неорганической матрицы транслируется на пористую структуру образующегося углерода с передачей ему наноразмерности. Однако полученные данные отличаются противоречивостью и требуют уточнения. С учетом возрастающего практического значения наносорбентов на основе термически обработанных и модифицированных углеродом алюмосиликатов актуальным является более детальное исследование строения и особенностей пористой структуры таких материалов.

Следует отметить, что низкотемпературный пиролиз органических прекурсоров не приводит к формированию углеродных фаз с высокой величиной удельной поверхности. Естественно, пиролиз необходимо проводить в условиях, при которых становится возможной графитизация образующихся углеродных продуктов. В обычных условиях это очень высокие температуры (выше 2000° С). В то же время известно, что в присутствии солей тяжелых металлов процесс графитизации можно осуществить и при температурах 700–1000° С. Нами предпринята попытка получения углеродных фаз с высокой удельной поверхностью пиролизом органических прекурсоров в присутствии солей кобальта, железа и др., которые могут служить катализатором процесса графитизации пиролитического углерода при не очень высоких температурах.

Целью данного исследования являлось получение композитных сорбентов на основе бентонита и углерода, введенного пиролизом сахарозы в условиях низкотемпературной каталитической графитизации.

## Материалы и методы

### Объекты исследования и методы их получения

Исходный порошок бентонита смешивался с сахарозой (1:4), с солями никеля, кобальта или железа (0,7 ммоль на 1 г бентонита) и дистиллированной водой до получения однородной массы. Полученную смесь ставили на сушку в муфельную печь при температуре 80°С на сутки.



Затем смесь отжигалась в атмосфере аргона при 650°C и промывалась водой от соли катализатора.

Исследовались следующие образцы сорбентов:

– природный бентонит Даш-Салахлинского месторождения (Азербайджан) – образец 1;

– исходный бентонит, модифицированный пиролизным углеродом из сахарозы без присутствия катализатора: образец Carbon\_1

– пиролизный углерод, полученный пиролизом сахарозы в присутствии катализатора азотнокислого кобальта (II) в отсутствие бентонита: образец Carbon\_2.

– исходный бентонит, модифицированный пиролизным углеродом из сахарозы в присутствии солей никеля (II) (0,7 ммоль [Ni<sup>2+</sup>]/г бентонита): образцы Carbon\_(Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), Carbon\_(NiSO<sub>4</sub>), Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>).

– исходный бентонит, модифицированный пиролизным углеродом из сахарозы в присутствии солей кобальта (II) (0,7 ммоль [Co<sup>2+</sup>]/г бентонита): образцы Carbon\_(Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), Carbon\_(CoSO<sub>4</sub>), Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>).

– исходный бентонит, модифицированный пиролизным углеродом из сахарозы в присутствии солей железа (III) (0,7 ммоль [Fe<sup>3+</sup>]/г бентонита): образец Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>),

– исходный бентонит, модифицированный пиролизным углеродом из сахарозы в присутствии солей железа (III) (0,7 ммоль [Fe<sup>3+</sup>]/г бентонита), промытый 0,1н раствором NaOH после пиролиза: образец Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>)\_OH.

#### **Методика изучения структурных характеристик сорбентов**

Изучение пористой структуры образцов проводили на быстродействующем анализаторе сорбции газов Quantachrome NOVA (США). Данный прибор позволяет измерять сорбцию различных газов твердофазными материалами, а программное обеспечение, поставляемое к прибору, используется для комплексной обработки экспериментальных данных.

Перед измерениями образцы предварительно дегазировались под вакуумом при температуре 300°C в течение 20 мин. Для измерения удельной поверхности твердых образцов использовался метод Брунауэра–Эммета–Тейлора (БЭТ). Для измерения объема пор и определения распределения пор по размерам использовался метод *Barrett–Joyner–Halenda* (ВЖН). В качестве исходных данных для расчетов по методу ВЖН используют десорбционную или адсорбционную ветвь изотермы в интервале давлений 0.967–0.4 P/P<sub>0</sub>.

#### **Методика проведения сорбционных экспериментов**

Навески исследуемых образцов сорбентов массой 2 г заливали дистиллированной водой на 1 ч, затем декантировали и заливали 100 мл модельного раствора солей свинца (II) и никеля (II), выдерживая 2 ч до достижения равновесной концентрации в растворе. Затем отбирали пробы из средних слоёв раствора. Количественный анализ элементного состава пробы производился на энергодисперсионном рентгеновском флуоресцентном спектрометре EDX-720 (SHIMADZU, Япония) методом калибровочных кривых.

#### **Результаты и их обсуждение**

##### **Влияние природы аниона соли катализатора на процесс каталитической графитизации углерода**

В табл. 1 приведены структурные характеристики композитных сорбентов на основе бентонита, модифицированных пиролизным углеродом ( $t = 650^\circ\text{C}$ ) в присутствии катализатора солей металлов подгруппы железа с различной природой анионов: нитраты, сульфаты, хлориды.

Как видно из данных табл. 1, модифицирование исходного бентонита низкотемпературным (650°C) пиролизом органических прекурсоров в присутствии солей подгруппы железа приводит к существенному повышению удельной поверхности сорбентов (до 275 м<sup>2</sup>/г) по сравнению с величиной удельной поверхности исходного бентонита (51 м<sup>2</sup>/г).

Анализ пористой структуры композитных сорбентов показал, что введение пиролизного углерода привело к существенному перераспределению размеров пор в сторону уменьшения: на долю пор с размерами в 1.5–4.0 нм приходится 63–66 %. В то же время введение углерода пиролизом сахарозы в отсутствие катализатора (образец Carbon\_1) привело к значительному уменьшению удельной поверхности бентонита. Аналогичный результат получен и при проведении каталитического пиролиза сахарозы, но в отсутствие бентонита (образец Carbon\_2). Анализ структурных характеристик образцов Carbon\_1 и Carbon\_2 показывает, что на процесс каталитической графитизации существенное влияние оказывает химический состав и структурная матрица бентонита. В его отсутствие пиролиз сахарозы и в присутствии катализатора не формирует углеродную фракцию с высокоразвитой поверхностью, и без катализатора не происходит процесс графитизации углерода.



Таблица 1 / Table 1

**Пористая структура композитных сорбентов на основе бентонита, модифицированных пиролизическим углеродом ( $t = 650^\circ\text{C}$ ) в условиях каталитической карбонизации солями металлов подгруппы железа**  
**Porous structure of composite sorbents based on bentonite modified with pyrolytic carbon ( $t = 650^\circ\text{C}$ ) under conditions of catalytic carbonization with metal salts of the iron subgroup**

Образец Sample	Удельная поверхность $S$ , $\text{m}^2/\text{g}$ Specific surface area $S$ , $\text{m}^2/\text{g}$	Объем пор $V_{\text{пор}}$ , $\text{cm}^3/\text{g}$ Pore volume, $\text{cm}^3/\text{g}$	Распределение пор по радиусам, % Pore radial distribution, %			
			1.5 – 2.0 нм (nm)	2.0 – 4.0 нм (nm)	4.0-8.0 нм (nm)	10.0–52.0 нм (nm)
Образец 1 (бентонит) Sample 1 (bentonite)	51	0.061	9	21	21	49
Carbon_1	13	–	–	–	–	–
Carbon_2	4	–	–	–	–	–
Carbon_(Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	160	0.018	19	43	25	13
Carbon_(NiSO <sub>4</sub> )	176	0.020	19	44	24	13
Carbon_(NiCl <sub>2</sub> )	189	0.024	19	44	24	13
Carbon_(Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	178	0.020	20	44	23	13
Carbon_(CoSO <sub>4</sub> )	198	0.025	21	44	22	13
Carbon_(CoCl <sub>2</sub> )	220	0.031	21	45	21	13
Carbon_(FeCl <sub>3</sub> )	252	0.040	21	45	22	12
Carbon_(FeCl <sub>3</sub> )_OH	275	0.045	21	45	22	12

Следует отметить, что природа аниона соли катализатора также влияет на величину удельной поверхности полученного сорбента. Так, в ряду анионов:  $\text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{Cl}^-$  происходит увеличение удельной поверхности полученного композитного сорбента после каталитического пиролиза с использованием хлоридных солей никеля (II), кобальта (II), железа (III). Это, возможно, связано с термической устойчивостью данных солей. Так, соль азотнокислого кобальта (II) разлагается при  $200\text{--}300^\circ\text{C}$  с образованием  $\text{CoO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_2$ . Образующийся кислород также пагубно влияет на процесс графитизации. Сернистый кобальт (II) разлагается уже при  $600\text{--}700^\circ\text{C}$  с образованием двойного оксида  $(\text{CoCo}_2)\text{O}_4$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{O}_2$ . Хлорид кобальта (II) плавится без разложения. Наибольшую величину удельной поверхности имеют композитные сорбенты, каталитическая графитизация углерода в которых происходила в присутствии хлоридов железа (образцы  $\text{Carbon}_-(\text{FeCl}_3)$  и  $\text{Carbon}_-(\text{FeCl}_3)\text{-OH}$ ).

**Сорбционные свойства композитных сорбентов на основе бентонита и углерода, полученного в условиях каталитической графитизации**

На рис. 1 и 2 в качестве примера приведены изотермы адсорбции ионов свинца (II) и никеля (II) на исходном бентоните (образец 1) и на компо-

зитных сорбентах на основе бентонита и углерода, введенного пиролизическим методом, в котором в качестве катализатора использовались хлориды металлов подгруппы железа:  $\text{Carbon}_-(\text{NiCl}_2)$ ,  $\text{Carbon}_-(\text{CoCl}_2)$  и  $\text{Carbon}_-(\text{FeCl}_3)$ .

Как видно из приведенных рисунков, по типу полученные изотермы сорбции ионов металлов можно отнести к изотермам типа Ленгмюра:

$$A = A_\infty \cdot \frac{K \cdot C_p}{(1 + K \cdot C_p)}, \quad (1)$$

где  $A$  – величина адсорбции;  $A_\infty$  – предельная величина адсорбции;  $K$  – константа адсорбционного равновесия;  $C_p$  – равновесная концентрация ионов металлов в растворе.

Обработка полученных изотерм сорбции в соответствии с уравнением Ленгмюра в обратных координатах (уравнение (2)) позволила оценить величину предельной сорбционной ёмкости исследуемых сорбентов на основе бентонита, модифицированных углеродом:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty K} \cdot C_p \quad (2)$$

Данные зависимости для исследуемых сорбентов приведены на рис. 3 и 4.

В табл. 2 приведены предельные значения адсорбции ионов свинца (II) и никеля (II)

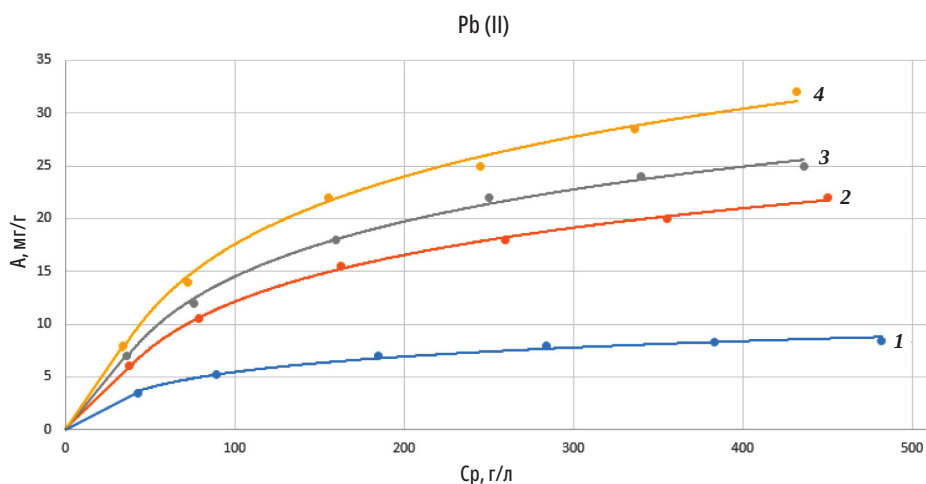


Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов свинца (II) на исходном бентоните (1) и на композитных сорбентах на основе бентонита и углерода, введенного пиролитическим методом, в котором в качестве катализатора использовались хлориды металлов подгруппы железа:

2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>) (цвет online)

Fig. 1. Isotherms of adsorption of lead (II) ions on the initial bentonite (1) and on composite sorbents based on bentonite and carbon introduced by the pyrolytic method, in which metal chlorides of the iron subgroup were used as a catalyst: 2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>) (color online)

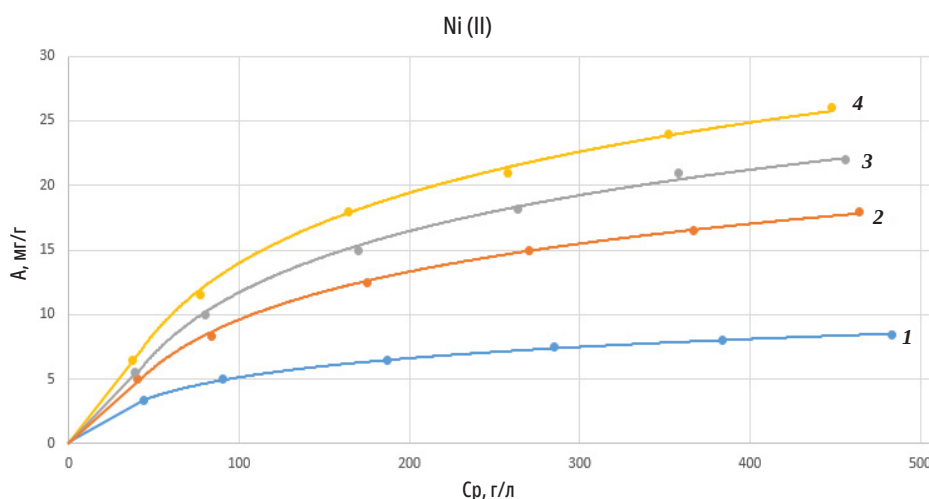


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов никеля (II) на исходном бентоните (1) и на композитных сорбентах на основе бентонита и углерода, введенного пиролитическим методом, в котором в качестве катализатора использовались хлориды металлов подгруппы железа:

2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>) (цвет online)

Fig. 2. Isotherms of adsorption of nickel (II) ions on the initial bentonite (1) and on composite sorbents based on bentonite and carbon introduced by the pyrolytic method, in which metal chlorides of the iron subgroup were used as a catalyst: 2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>) (color online)

композитными сорбентами на основе бентонита, модифицированными пиролитическим углеродом ( $t = 650^\circ\text{C}$ ) в присутствии в качестве катализаторов солей металлов подгруппы железа. Как видно из данных табл. 2, использование технологии низкотемпературной каталитической графитизации

пиролитического углерода при создании композитных сорбентов на основе бентонита приводит к повышению сорбционных свойств сорбентов. В основном это связано с развитием поверхности сорбентов и повышением сорбционных свойств углеродной фракции.

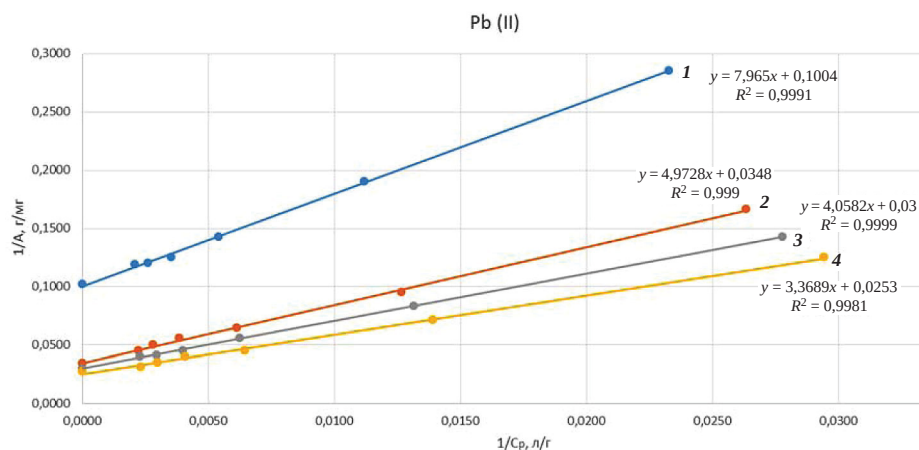


Рис. 3. Изотермы адсорбции ионов свинца (II) на исходном бентоните (1) и на композитных сорбентах на основе бентонита и углерода, введенного пиролитическим методом: 2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>), представленные в обратных координатах в соответствии с уравнением Ленгмюра (2) (цвет online)

Fig. 3. Isotherms of adsorption of lead (II) ions on the initial bentonite (1) and on composite sorbents based on bentonite and carbon introduced by the pyrolytic method: 2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>), presented in inverse coordinates in accordance with the Langmuir equation (2) (color online)

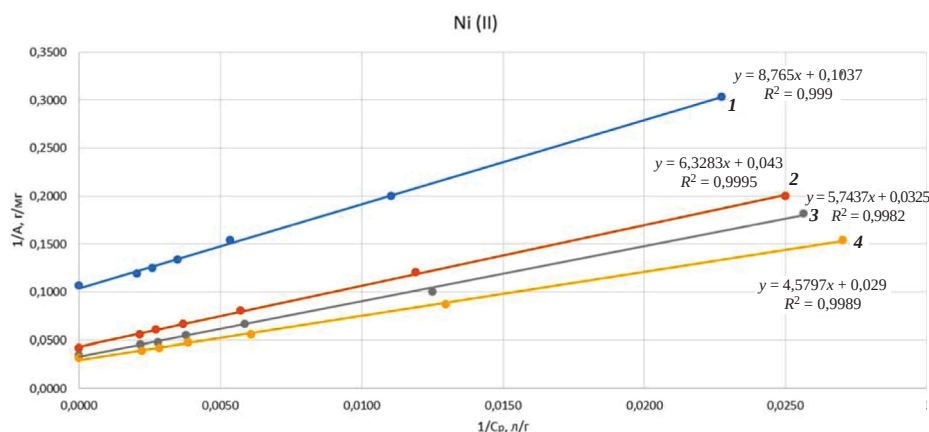


Рис. 4. Изотермы адсорбции ионов никеля (II) на исходном бентоните (1) и на композитных сорбентах на основе бентонита и углерода, введенного пиролитическим методом: 2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>), представленные в обратных координатах в соответствии с уравнением Ленгмюра (2) (цвет online)

Fig. 4. Isotherms of adsorption of nickel (II) ions on the initial bentonite (1) and on composite sorbents based on bentonite and carbon introduced by the pyrolytic method: 2 – Carbon\_(NiCl<sub>2</sub>); 3 – Carbon\_(CoCl<sub>2</sub>); 4 – Carbon\_(FeCl<sub>3</sub>), presented in inverse coordinates in accordance with the Langmuir equation (2) (color online)

### Заключение

1. Изучены структурные и сорбционные свойства композитных сорбентов на основе бентонита, модифицированных пиролитическим углеродом, полученным в условиях каталитической карбонизации.

2. Показано, что модифицирование исходного бентонита низкотемпературным (650°C) пиролизом органических прекурсоров (сахара) в присутствии солей металлов подгруппы железа приводит к существенному повышению удельной поверхности композитных сорбентов

(до 275 м<sup>2</sup>/г) и к существенному перераспределению размеров пор в сторону их уменьшения: на долю пор с размерами в 1.5–4.0 нм приходится 63–66%, что обусловлено низкотемпературной каталитической графитизацией образующейся в процессе пиролиза углеродной фракции.

3. Установлено, что природа аниона соли катализатора также влияет на величину удельной поверхности полученного сорбента. В ряду анионов NO<sub>3</sub><sup>-</sup> < SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> < Cl<sup>-</sup> происходит увеличение удельной поверхности полученного композитного сорбента после каталитического пиролиза с ис-



Таблица 2 / Table 2

**Пределные значения адсорбции ионов свинца (II) и никеля (II) композитными сорбентами на основе бентонита, модифицированных пиролитическим углеродом ( $t = 650^{\circ}\text{C}$ ) в условиях каталитической графитизации**  
**Limit values of adsorption of lead (II) and nickel (II) ions by composite sorbents based on bentonite modified with pyrolytic carbon ( $t = 650^{\circ}\text{C}$ ) under conditions of catalytic graphitization**

Образцы сорбентов / Sorbent samples	Пределные значения адсорбции ионов, мг/г Limit values of ion adsorption, mg/g	
	Pb (II)	Ni (II)
Образец 1 (бентонит) / Sample 1 (bentonite)	9,9	9,6
Carbon_(Ni(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	21	18
Carbon_(NiSO <sub>4</sub> )	24	22
Carbon_(NiCl <sub>2</sub> )	29	23
Carbon_(Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	28	24
Carbon_(CoSO <sub>4</sub> )	30	26
Carbon_(CoCl <sub>2</sub> )	33	30
Carbon_(FeCl <sub>3</sub> )	38	34
Carbon_(FeCl <sub>3</sub> )-OH	39	37

пользованием солей никеля (II), кобальта (II), железа (II), что связано с более высокой термической устойчивостью хлоридов металлов.

4. Изучена сорбционная способность исследуемых наноструктурных композитных сорбентов по отношению к ионам никеля (II), свинца (II). Показано, что пиролитический способ введения углерода с одновременной его каталитической графитизацией в композитные сорбенты на основе бентонита приводит к существенному увеличению сорбционной активности сорбентов и является перспективным способом совершенствования природных сорбентов.

**Список литературы**

1. Ковзун И. Г. Межфазные взаимодействия в процессах образования щелочных силикатных и углесиликатных систем : дис. ... д-ра хим. наук. М., 1992. 346 с.
2. Дорошенко В. Е., Тарасевич Ю. И., Козуб Г. А. Сорбция фенола полусинтетическими и природными сорбентами // Химия и технология воды. 1995. Т. 17, № 3. С. 248–251.
3. Гончарук В. В., Соболева Н. Н., Носонович А. Н. Физико-химические аспекты проблемы загрязнения почв и гидросферы тяжелыми металлами // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. № 11. С. 795–809.
4. Саранчук В. И., Ильяшев М. А., Ошовский В. В., Саранчук Е. В. Углерод: неизвестное об известном. Донецк : УК Центр, 2006. 400 с.
5. Стрелко В. В., Ставицкая С. С., Зажигалов В. А. Селективная сорбция и катализ на активных углях и неорганических ионитах. Киев : Наукова Думка, 2008. 304 с.
6. Паныко А. В., Ковзун И. Г., Ульберг З. Р. Использование нанопористых глин в качестве сорбентов для удаления фталатов из водных сред // Нанопористые материалы. 2009. № 2. С. 93–120.

7. Ханхасаева С. Ц., Бадмаева С. В., Дашиманжилова Э. Ц. Влияние модифицирования на структурные, кислотные и каталитические свойства природного слоистого алюмосиликата // Кинетика и катализ. 2004. Т. 5, № 5. С. 748–753.

**References**

1. Kovzun I. G. *Interphase interactions in the formation of alkaline silicate and carbon-silicate systems*. Diss. Dr. Sci. (Chem.). Moscow, 1992. 346 p. (in Russian).
2. Doroshenko V. E., Tarasevich Yu. I., Kozub G. A. Sorption of phenol by semi-synthetic and natural sorbents. *Chimiya i tehnologiya vody*, 1995, vol. 17, no. 3, pp. 248–251 (in Russian).
3. Goncharuk V. V., Soboleva N. N., Nosonovich A. N. Physicochemical aspects of the problem of soil and hydrosphere pollution with heavy metals. *Chemistry for Sustainable Development*, 2003, no. 11, pp. 795–809 (in Russian).
4. Saranchuk V. I., Il'yashev M. A., Oshovsrij V. V., Saranchuk E. V. *Uglerod: neizvestnoe ob izvestnom* [Carbon: The unknown about the known]. Donetsk, UK Zentr Publ., 2006. 400 p. (in Russian).
5. Strelko V. V., Stavitskaya S. S., Zazhigalov V. A. *Selektivnaya sorbtziya i kataliz na aktivnykh uglyakh i neorganicheskikh ionotakh* [Selective sorption and catalysis on activated carbons and inorganic ion exchangers]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 2008. 304 p. (in Russian).
6. Pan'ko A. V., Kovzun I. G., Ul'berg Z. R. The use of nanoporous clays as sorbents for the removal of phthalates from aqueous media. *Nanoporous Materials*, 2009, no. 2, pp. 93–120 (in Russian).
7. Hanhasaeva S. C., Badmaeva S. V., Dashimanzhilova E. C. The effect of modification on the structural, acidic and catalytic properties of natural layered aluminosilicate. *Kinetics and Catalysis*, 2004, vol. 5, no. 5, pp. 748–753 (in Russian).

Поступила в редакцию 08.11.21; одобрена после рецензирования 25.11.21; принята к публикации 01.12.21  
 The article was submitted 08.11.21; approved after reviewing 25.11.21; accepted for publication 01.12.21