

**СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПОЗИТА
БЕНТОНИТ - АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ****Д.Н. Смирнова, И.С. Гришин, Н.Н. Смирнов**

Дарья Николаевна Смирнова (ORCID 0000-0002-6976-5277)*

Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук (ИХР РАН), ул. Академическая, д. 1, Иваново, Российская Федерация, 153045

E-mail: dasha.nicolaevna@mail.ru

Илья Сергеевич Гришин (ORCID 0000-0002-2038-3809), Николай Николаевич Смирнов (ORCID 0000-0002-4774-1362)

Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: grish.in.03.97@gmail.com, nnsmi@mail.ru

Развитие технологии адсорбционной очистки в промышленности оторвано от исследований в области разработки новых методов синтеза и модифицирования композитов, в то время как эффективность адсорбента напрямую зависит от его структурных и поверхностных свойств. В настоящее время увеличивается потребность в гидрогелевых адсорбентах, применяемых в фармацевтике, медицине, химической промышленности для очистки сточных вод. В качестве объекта исследования использован Даш-Салахлинский бентонит - природный глинистый минерал и активированный уголь марки БАУ-А. Интеркалированием бентонита активированным углем получен композит бентонит-уголь. Использовано измельчающее оборудование средней энергонапряженности: ролико-кольцевая вибромельница VM-4. Время активации 15 мин. Методом лазерной дифракции на анализаторе размера частиц определен средний размер частиц исходного бентонита и бентонит-углеродного композита. При механоактивации бентонита характер распределения частиц свидетельствует о преимущественном процессе агрегирования над измельчением. Методами низкотемпературной адсорбции-десорбции азота, ИК-спектроскопии исследованы морфология, структура и текстурные свойства композита. Увеличение удельной поверхности и пористости после механохимической активации по сравнению с расчетной указывает на взаимодействие между компонентами. ИК-спектроскопией установлено образование дополнительных функциональных групп, которые могут выступать в роли активных центров, что положительно влияет на адсорбционные свойства. Показано, что композит бентонит-уголь обладает высокой сорбционной активностью по отношению к красителю бриллиантовому зеленому. Полученные данные могут быть полезны при разработке эффективных сорбентов очистки сточных вод от загрязнения органическими соединениями, а также в медицине и фармацевтике.

Ключевые слова: бентонит, композит, структура, активированный уголь, сорбент, бриллиантовый зеленый

**SYNTHESIS, STRUCTURE AND PROPERTIES
OF BENTONITE - ACTIVATED CARBON COMPOSITE****D.N. Smirnova, I.S. Grishin, N.N. Smirnov**

Daria N. Smirnova (ORCID 0000-0002-6976-5277)*

G.A. Krestov Institute of Chemistry of Solutions of the RAS, Academicheskaya st., 1, Ivanovo, 153045, Russia

E-mail: dasha.nicolaevna@mail.ru

Ilya S. Grishin (ORCID 0000-0002-2038-3809), Nikolai N. Smirnov (ORCID 0000-0002-4774-1362)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: grish.in.03.97@gmail.com, nnsmi@mail.ru

The development of adsorption purification technology in industry is divorced from research in the development of new methods for the synthesis and modification of composites, while the efficiency of the adsorbent directly depends on its structural and surface properties. Currently, there is an increasing demand for hydrogel adsorbents used in pharmaceuticals, medicine, and the chemical industry for wastewater treatment. Dash-Salakhlin'sky bentonite, a natural clay mineral and activated carbon of the BAU-A brand, was used as an object of study. By intercalation of bentonite with activated carbon, a bentonite-coal composite was obtained. Grinding equipment of medium energy density was used: roller-ring vibrating mill VM-4. Activation time was 15 min. The average particle size of the initial bentonite and bentonite-carbon composite was determined by laser diffraction on a particle size analyzer. During mechanical activation of bentonite, the nature of the distribution of particles indicates the predominant process of aggregation over grinding. The morphology, structure, and textural properties of the composite were studied by the methods of low-temperature nitrogen adsorption-desorption and IR spectroscopy. An increase in the specific surface area and porosity after mechanochemical activation as compared to the calculated values indicates the interaction between the components. IR spectroscopy established the formation of additional functional groups that can act as active centers, which positively affects the adsorption properties. It is shown that the bentonite-charcoal composite has a high sorption activity with respect to the brilliant green dye. The data obtained can be useful in the development of effective sorbents for wastewater treatment from pollution by organic compounds, as well as in medicine and pharmaceuticals.

Key words: bentonite, composite, structure, activated carbon, sorbent, brilliant green

Для цитирования:

Смирнова Д.Н., Гришин И.С., Смирнов Н.Н. Синтез, структура и свойства композита бентонит - активированный уголь. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 2. С. 59–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6903.

For citation:

Smirnova D.N., Grishin I.S., Smirnov N.N. Synthesis, structure and properties of bentonite - activated carbon composite. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 2. P. 59–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6903.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии адсорбционной очистки в промышленности большей частью оторвано от исследований в области разработки новых методов синтеза и модифицирования сорбентов, в то время как эффективность адсорбента напрямую зависит от его структурных и поверхностных свойств. В настоящее время в мире постепенно увеличивается потребность в гидрогелевых адсорбентах, применяемых в фармацевтике, медицине, химической промышленности [1].

Создание многофункциональных гибридных материалов на основе экологически безопасных слоистых алюмосиликатов для применения в биотехнологии, медицине и экологии является актуальной задачей. Из всего многообразия алюмосиликатов наиболее перспективными для получения композитов являются широко распространенные в природе бентонитовые породы глины $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$, содержащие не менее 70% минерала монтмориллонита [2, 3]. Минералы этой группы обладают уникальными текстурными и фи-

зико-химическими свойствами, такими как – развитая удельная поверхность, регулярное распределение пор, высокая термическая устойчивость, связующая способность, а также каталитическая и адсорбционная активность. В качестве примесей в бентонитах присутствуют кальцит, цеолиты, кварц, кристобалит, гидрослюда, каолинит, полевой шпат, галлуазит и прочие.

Однако отсутствие эффективных технологий гранулирования является сдерживающим фактором для широкого использования бентонитов для очистки воды, поскольку глинистые минералы подвержены эффекту диспергирования в водных средах [4].

Одним из способов получения нанокомпозитов на основе бентонита является модификация алюмосиликата. Введение посторонних наночастиц способствует разрушению иерархической структуры, образованной в результате слипания отдельных кристаллитов слоевого силиката, и может привести к изменению текстурных и физико-химических свойств полученного композита. Среди используемых модификаторов интерес представляет активированный уголь.

В настоящее время основные направления использования углеродных сорбентов связаны с технологическими процессами адсорбционной очистки, разделения, выделения и концентрирования в газовых и жидких средах. Постоянно возрастает роль углеродных сорбентов в решении экологических проблем: очистке питьевой воды, стоков, отходящих газов предприятий промышленности и энергетики. Расширяются области использования углеродных сорбентов в медицине и фармацевтике. К современным методам адсорбционной терапии относятся гемосорбция (очистка крови, лимфы от токсичных веществ), энтеросорбция (лечение желудочно-кишечных заболеваний, аллергии, диабета) [5].

Качественные характеристики угольных сорбентов находятся в прямой зависимости от изменения площади их поверхности и структуры, а, следовательно, во многом определяются методом получения.

Весьма интересной представляется задача синтеза адсорбентов из различных видов сырья с использованием методов механохимической активации (МХА). Это позволит существенно повысить сорбционную способность данного материала за счет накопления в кристаллической структуре адсорбента дефектов различного рода и увеличения числа кислотных центров на их поверхности [6, 7].

Целью настоящей работы является получение композитов на основе бентонита и активированного угля механохимическим методом, исследование их структуры и сорбционных свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования был использован Даш-Салахлинский бентонит – природный глинистый минерал, имеющий свойство разбухать при гидратации (в 14-16 раз). Агломератовый бентонит. Плотность 2,18 г/см³. Ионообменная емкость глины от 75 до 120 мг-экв/100 г глины.

Таблица 1

Химический состав Даш-Салахлинского бентонита
Table 1. Chemical composition of Dash-Salakhli bentonite

Образец	Содержание оксидов, % масс.							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ППП
Природный	57,7	13,75	5,27	4,29	2,67	1,9	0,23	15,99

В качестве модифицирующего вещества был применен активированный уголь марки БАУ-А ГОСТ 6217-74 [8, 9].

Бентонит-углеродный композит получен с использованием измельчающего оборудования средней энергонапряженности: роliko-кольцевая вибромельница ИМ-4 с частотой колебаний 930 мин⁻¹ и энергонапряженностью 5,4 кВт/кг, мелющие тела – стальной цилиндр и кольцо общей массой 1,1 кг, ударно-стирающий тип воздействия, амплитуда вибрации в радиальном направлении – 10 мм, в аксиальном – 1 мм, масса загружаемого материала 40,0 г. Время активации 15 мин.

Средний размер частиц исходного бентонита и бентонит-углеродного композита определяли методом лазерной дифракции на анализаторе размера частиц "Analysette 22" СОМРАСТ.

Удельную поверхность глины, полученных адсорбентов определяли методом низкотемпературной адсорбции и десорбции азота на приборе Sorbi-MS. Площадь поверхности вычисляли по уравнению БЭТ [10]. Общий объем пор алюмосиликатов, распределение пор по размерам рассчитывали с применением модели Barrett-Joyner-Halenda (ВЈН).

Инфракрасная спектроскопия исследуемых адсорбентов проводилась методом диффузного отражения на ИК-Фурье спектрометре Tensor 27. Данный прибор позволяет получать спектры в диапазоне от 4000 см⁻¹ до 400 см⁻¹ [11].

Сорбционные свойства бентонита и композита по отношению к синтетическому анилиновому красителю трифенилметанового ряда (C₂₇H₃₄N₂O₄S – бриллиантовый зеленый) исследовали в статических условиях при комнатной температуре методом распределения вещества между твердой и жидкой фазами. Отношение объема раствора к массе сорбента равно 100. Навеску сорбента помещали в водный раствор красителя и выдерживали при перемешивании определенные промежутки времени, далее фазы разделяли. Начальная концентрация красителя в растворе составляла C₀ = 0,69 · 10⁻⁵ моль/л. Сорбционный процесс контролировали по изменению оптической плотности раствора, которую определяли методом спектрофотометрии при λ = 625 нм (спектрофотометр U-2001, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение частиц бентонита и механоактивированной с углем глины по размерам представлены в виде гистограмм. Как видно из рис. 1 а, б, уголь после измельчения в вибромельнице в течение 15 мин содержит частицы размером от 0,3 до 25 мкм, в то время как алюмосиликат – до 65 мкм. При механоактивации бентонита характер распре-

деления частиц свидетельствует о преимущественном процессе агрегирования над измельчением.

При введении угля в бентонит характер распределения частиц аналогичен процессу из-

мельчения угля. При добавлении 30% угля в композит превалирует процесс измельчения над агрегированием. Дальнейшее повышение содержания угля в смеси с глиной приводит к незначительному уменьшению крупных частиц.

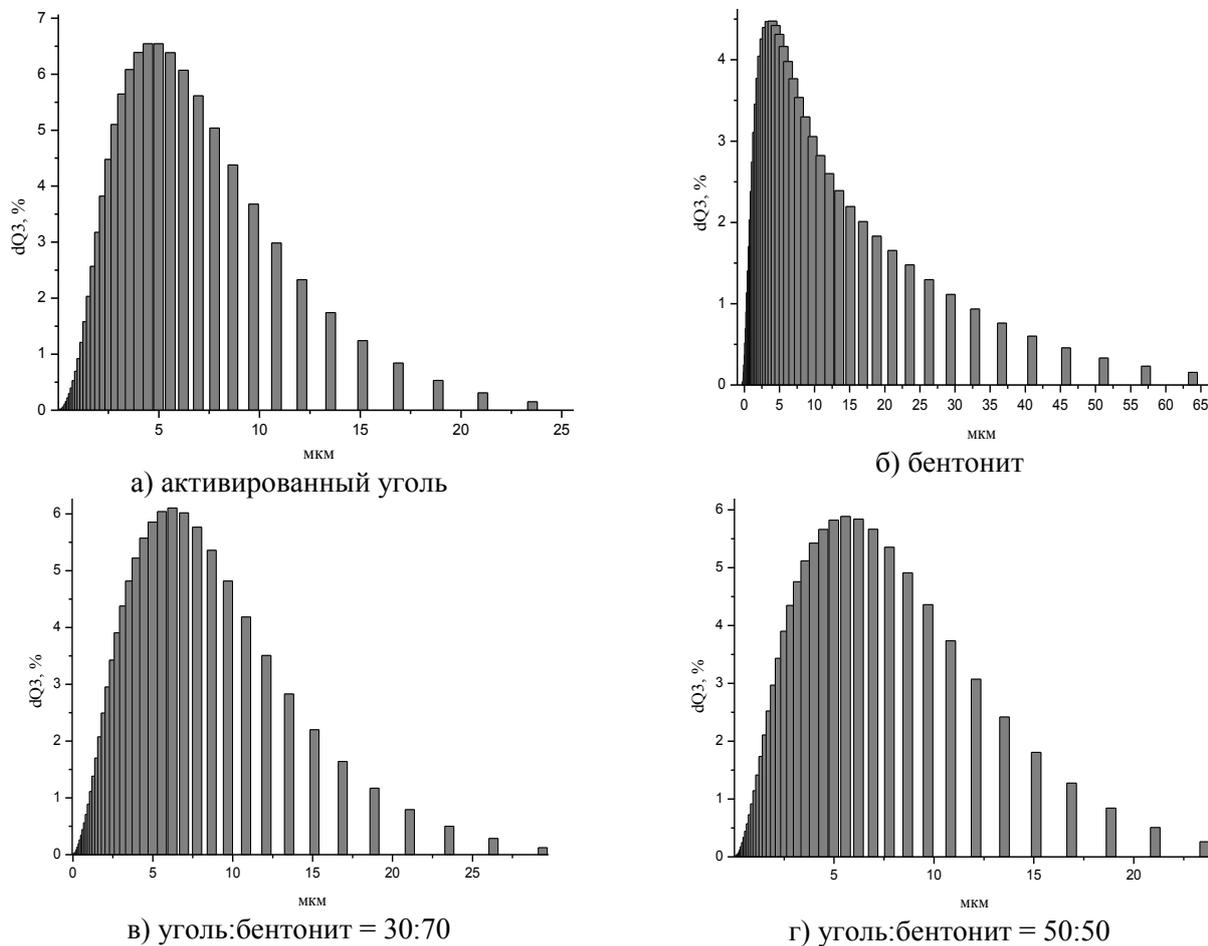


Рис. 1. Распределение частиц активированного угля (а), бентонита (б), и механоактивированного бентонита с углем (в,г) по размерам

Fig. 1. Distribution of particles of activated carbon (а), bentonite (б), and mechanically activated bentonite with coal (в, г) by size

Структурно-сорбционные характеристики исследуемых алюмосиликатов были получены по результатам адсорбции и десорбции азота при 77К (рис. 2). Изотермы адсорбции азота для бентонита и модифицированной глины (рис. 2а) относятся к IV типу по классификации IUPAC. Такой вид изотерм характерен для твердых тел, имеющих мезопоры по классификации Дубинина. Кроме того, представленная изотерма образует петлю гистерезиса и по классификации Де-Бура относится к типу В [10]. В начальной части изотермы адсорбция ограничена образованием тонкого слоя сорбата на стенках пор. Относительное давление $p/p_0 = 0,40$ является основанием петли гистерезиса и соот-

ветствует началу капиллярной конденсации в наиболее тонких порах. При p/p_0 , близком к 1, наблюдается подъем сорбционной кривой, указывающий на наличие в образцах крупных пор. Кривая распределения пор по размерам имеет унимодальный (одновершинный) характер (рис. 2б).

О характере взаимодействия между углем и бентонитом судили по изменению поверхности и пористости. Удельная поверхность угля составляет $1070 \text{ м}^2/\text{г}$, а у бентонита – $26 \text{ м}^2/\text{г}$ (табл. 2). Удельная поверхность композита рассчитывалась с учетом соотношения компонентов и сопоставлялась с измеренной (обр. 3, 4 на рис. 2).

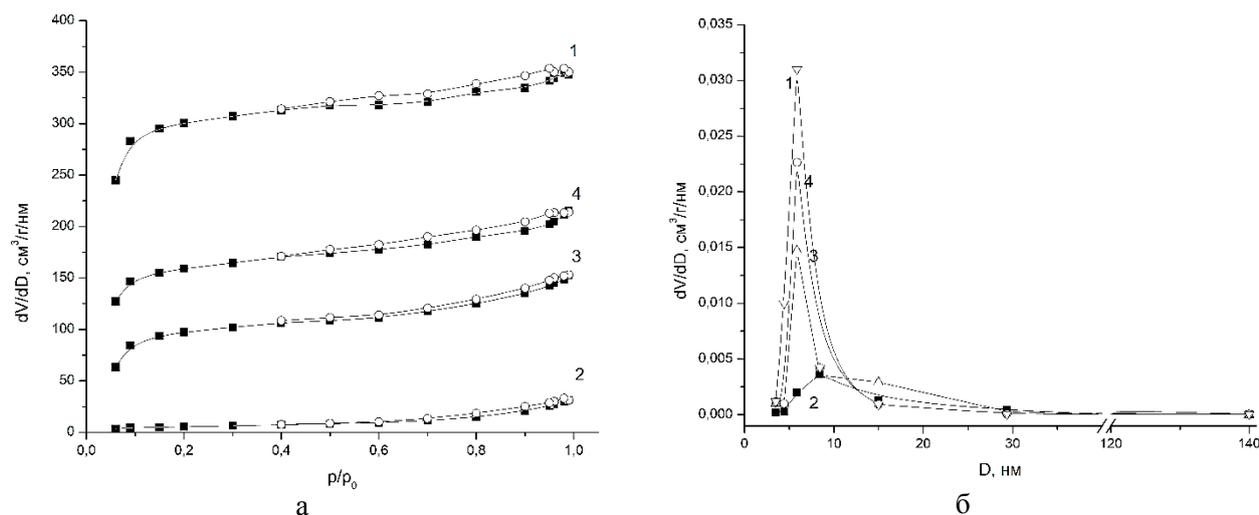


Рис. 2. Изотермы низкотемпературной адсорбции–десорбции паров азота (а) и дифференциальные кривые распределения объема пор по размерам (б) для образцов: 1 – активированный уголь; 2 – бентонит; 3 – уголь:бентонит = 30:70; 4 – уголь:бентонит = 50:50

Fig. 2. Isotherms of low-temperature adsorption–desorption of nitrogen vapors (a) and differential curves of pore volume distribution by size (b) for samples: 1 – activated carbon; 2 - bentonite; 3 - coal: bentonite = 30:70; 4 - coal: bentonite = 50:50

Таблица 2

Параметры пористой структуры образцов
Table 2. Parameters of the porous structure of the samples

Параметр	Образец			
	Активированный уголь	Бентонит	Уголь:бентонит 30:70	Уголь:бентонит 50:50
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	1070,0	26,1	373,8	562,7
Общий объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	0,519	0,048	0,225	0,331
Объем микропор, $\text{см}^3/\text{г}$	0,390	отсутствуют	0,091	0,176
Объем мезо- и макропор, $\text{см}^3/\text{г}$	0,129	0,048	0,134	0,155

Удельная поверхность адсорбентов после механохимической активации возрастала по сравнению с расчетной для образца 3 на 11%, для образца 4 на 3%. Аналогичные результаты наблюдались при сопоставлении величины общей пористости. Прирост общей пористости для третьего образца составлял 19%, для четвертого – 17%.

Эти факты указывают на то, что механохимическая активация смеси сопровождается взаимодействием между компонентами.

Информация о характере структурно-химических изменений в процессе модификации бентонита активированным углем была получена при анализе колебательных спектров угля, исходного и модифицированного образцов алюмосиликата (рис. 3).

На ИК спектре активированного угля (рис. 3, обр. 1) отмечается достаточно широкая полоса в диапазоне волнового числа $3200\text{--}3600 \text{ см}^{-1}$, которая характерна для связи O–H. Гидроксильные фрагменты являются составными частями, например, фенольных и карбоксильных групп. Кроме того, это могут быть колебания в молекулах адсор-

бированной воды [12]. В области $2850\text{--}2950 \text{ см}^{-1}$ находятся полосы, отвечающие валентным колебаниям связи C–H, деформационным колебаниям этой связи соответствует полоса 1395 см^{-1} . Несколько полос в интервале $1600\text{--}1760 \text{ см}^{-1}$ характеризуют валентные колебания связи C=O в карбоксильных и кетонных группах. В этом же районе находятся полосы, соответствующие колебаниям связи C=C в ароматической системе. Полоса 1090 см^{-1} отвечает колебаниям связи C–O в эфирных и спиртовых группировках [13].

Как и в случае с активированным углем, на спектре исходного бентонита (рис. 3, обр. 2) наблюдается широкая полоса в области $3400\text{--}3700 \text{ см}^{-1}$ с двумя экстремумами. Полоса 3424 см^{-1} отражает колебания связи O–H в молекулах воды, а полоса 3630 см^{-1} свидетельствует о колебаниях этой связи в силанолах Si–O–H [14]. Наличие структурной воды подтверждается полосой 1630 см^{-1} [15]. Пик в области 1044 см^{-1} соответствует колебаниям связи Si–O в алюмосиликате, а также небольшие полосы $794, 465$ и 521 см^{-1} характеризуют колебания связей Si–O–Si и Al–O–Si соответственно [16].

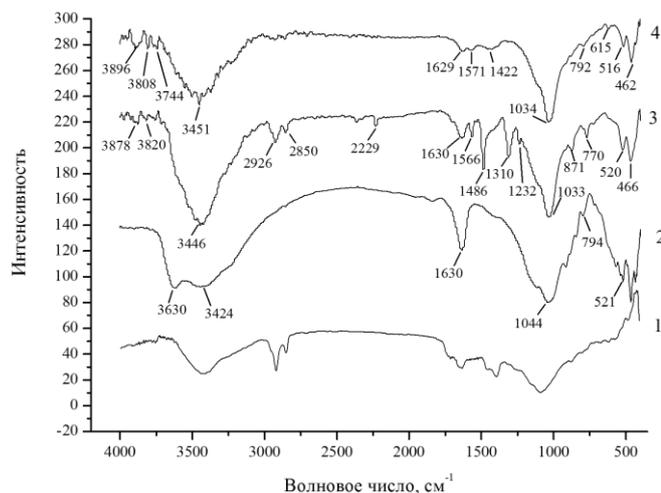


Рис. 3. ИК спектры: 1 – активированный уголь; 2 – бентонит, 3 – уголь:бентонит = 30:70; 4 – уголь:бентонит = 50:50. Время механоактивации 15 мин

Fig. 23. IR spectra: 1 - activated carbon; 2 - bentonite, 3 - coal:bentonite = 30:70; 4 - coal:bentonite = 50:50. The mechanoactivation time is 15 min

ИК спектры образцов, полученных при совместной механической обработке активированного угля и бентонита (рис. 3, обр.3 и 4), демонстрируют полосы, которые характерны для обоих этих материалов. В первую очередь стоит отметить исчезновение полосы 3630 см^{-1} , что можно объяснить взаимодействием угля и алюмосиликата посредством силанольных группировок, в результате чего могут образоваться связи Si-O-C (1232 см^{-1}) [17]. Вероятна и конденсация нескольких силанольных фрагментов с получением силоксанов Si-O-Si. Отмечается также появление нескольких полос в области $3700\text{-}3900\text{ см}^{-1}$, отражающих колебания связи Al-O-H [16]. По всей видимости, при механической активации происходит вытеснение и перестройка вакансий для OH-групп, что согласуется с уменьшением интенсивности полосы 1630 см^{-1} [18]. Образование дополнительных функциональных групп, которые могут выступать в роли активных центров, положительно влияет на адсорбционные свойства. На спектре образца 4 практически полностью отсутствуют полосы в области $2850\text{-}2950\text{ см}^{-1}$, а их интенсивность на спектре образца 3 снижена. Это может свидетельствовать об окислении активированного угля, в результате чего могут образоваться дополнительные кислородсодержащие группы [19]. Так, отмечается появление новых полос при 1570 и 1310 см^{-1} , что наиболее выражено у образца 3.

Сорбционные свойства бентонита и модифицированной глины были изучены по отношению к синтетическому анилиновому красителю трифенилметанового ряда бриллиантовому зеленому (БЗ) (рис. 4).

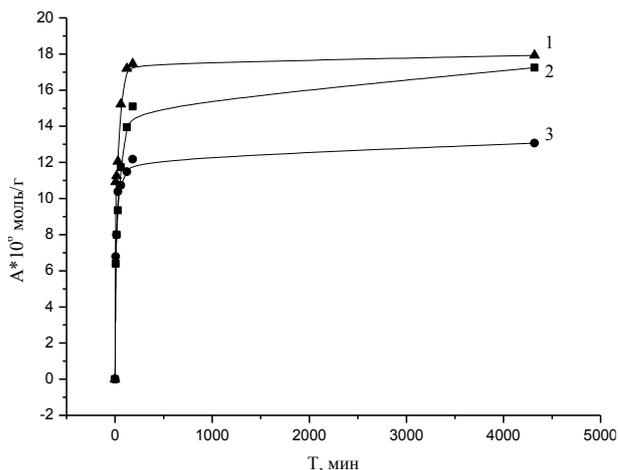


Рис. 4. Кривые сорбции бриллиантового зеленого: 1 – уголь:бентонит = 30:70; 2 – активированный уголь; 3 – уголь:бентонит = 50:50. Время механоактивации 15 мин

Fig. 4. Sorption curves of brilliant green: 1 – coal:bentonite = 30:70; 2 - activated charcoal; 4 - coal:bentonite = 50:50. The mechanoactivation time is 15 min

При проведении кинетических экспериментов с бентонитом в качестве сорбента обнаружено значительное снижение интенсивности окраски раствора, что свидетельствует о переходе БЗ в фазу сорбента. Однако, количественно определить степень извлечения красителя не представляется возможным из-за трудности разделения фаз, поскольку алюмосиликат образует в воде устойчивые коллоидные суспензии. Поэтому кривая сорбции на чистом бентоните отсутствует.

Сорбция бриллиантового зеленого на механоактивированном углем бентоните протекает с высокой скоростью, краситель в течение 5 мин практически полностью переходит в фазу сорбента. Лучшими характеристиками обладает образец, в котором содержится 30% активированного угля. Равновесное количество адсорбированного красителя достигает $18 \cdot 10^{-6}$ моль/г.

ВЫВОДЫ

Проведено интеркалирование бентонита активированным углем и получен композит бентонит/уголь. Увеличение удельной поверхности и пористости после механохимической активации по сравнению с расчетной указывает на взаимодействие между компонентами. ИК-спектроскопией установлено образование дополнительных функциональных групп, которые могут выступать в роли активных центров, что положительно влияет на адсорбционные свойства. Показано, что композит бентонит/уголь обладает высокой сорбционной активностью по отношению к красителю бриллиантовому зеленому. Полученные данные могут

быть полезны при разработке эффективных сорбентов в медицине и фармацевтике.

Практическая часть работы выполнена в рамках плана работ лаборатории технологического дизайна каталитических и адсорбционных систем на основе переходных металлов для процессов переработки углеводородов и решения экологических проблем производств минерально-сырьевого комплекса (№ 01-ГЗ-24).

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The practical part of the work was carried out as part of the work plan of the laboratory of technological design of catalytic and adsorption systems based on transition metals for hydrocarbon processing and addressing environmental challenges of mineral raw material complex (No. 01-GZ-24).

The study was carried out using the resources of the Center for Collective Use of Scientific Equipment at ISUCT.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юлдашев Ж.Б., Бойматов И.М., Маматалиев Н.Н., Очилов А.М., Тлеубаев С.О. Гидрофильные свойства углеминеральных сорбентов на основе навбахорского щелочного бентонита. *Sci. Educ.* 2020. V. 1. P. 63–67.
2. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. Handbook of Clay Science. Elsevier Ltd. 2006. V. 1. P. 1224. DOI: 10.1016/S1572-4352(05)01001-9.
3. Gil A., Korili S.A., Vicente M.A. Recent Advances in the Control and Characterization of the Porous Structure of Pillared Clay Catalysts. *Catal. Rev. Sci. Eng.* 2008. V. 50. N 2. P. 153. DOI: 10.1080/01614940802019383.
4. Khamroev J.Kh, Fayzullaev N.I., Khaidarov G.Sh., Temirov F.N., Jalilov M.Kh. Texture and Sorption Characteristics of Bentonite-Based Sorbents. *Ann. Romanian Soc. Cell Biol.* 2021. V. 25. Iss. 4. P. 828 – 849.
5. Кузнецов Н.Б. Синтез и применение углеродных сорбентов. *Сорос. Образоват. Журн.* 1999. № 12. С. 29–34.
6. Кинле Х. Активные угли и их промышленное применение. Л.: Химия. 1984. 216 с.
7. Пухов И.Г., Смирнова Д.Н., Ильин А.П., Смирнов Н.Н. Исследование кислотно-основных свойств поверхности углеродных адсорбентов методом потенциометрического титрования. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2012. Т. 55. Вып. 12. С. 117-122.
8. Кольшхин Д.А. Активные угли. Средства и методы испытаний. Л.: Химия. 1972. 56 с.
9. Олонцев В.Ф. Некоторые тенденции в производстве и применении активных углей в мировом хозяйстве. *Хим. Пром.* 2000. № 8. С. 7-14.
10. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир. 1984. 306 с.
11. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия. М.: Мир. 1982. 328 с.
12. Tzvetkov G., Mihaylova S., Stoitchkova K., Tzvetkov P., Spassov T. Mechanochemical and chemical activation of lignocellulosic material to prepare powdered activated carbons for adsorption applications. *Powder Technol.* 2016. V. 299. P. 41–50. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.05.033.
13. Ali R., Aslam Z., Shawabkeh R.A., Asghar A., Hussein I.A. BET, FTIR, and RAMAN characterizations of activated carbon from wasteoil fly ash. *Turk. J. Chem.* 2020. V. 44(2). P. 279–295. DOI: 10.3906/kim-1909-20.
14. Nabil M., Mahmoud K.R., El-Shaer A., Nayber H.A. Preparation of crystalline silica (quartz, cristobalite, and tridymite) and amorphous silica powder (one step). *J. Phys. Chem. Solids.* 2018. V. 121. P. 22–26. DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.05.001.

REFERENCES

1. Yuldashev Zh.B., Boimatov I.M., Mamataliev N.N., Ochilov A.M., Tleubaev S.O. Hydrophilic properties of coal-mineral sorbents based on Navbakhor alkaline bentonite. *Sci. Educ.* 2020. V. 1. P. 63–67.
2. Bergaya F., Theng B.K.G., Lagaly G. Handbook of Clay Science. Elsevier Ltd. 2006. V. 1. P. 1224. DOI: 10.1016/S1572-4352(05)01001-9.
3. Gil A., Korili S.A., Vicente M.A. Recent Advances in the Control and Characterization of the Porous Structure of Pillared Clay Catalysts. *Catal. Rev. Sci. Eng.* 2008. V. 50. N 2. P. 153. DOI: 10.1080/01614940802019383.
4. Khamroev J.Kh, Fayzullaev N.I., Khaidarov G.Sh., Temirov F.N., Jalilov M.Kh. Texture and Sorption Characteristics of Bentonite-Based Sorbents. *Ann. Romanian Soc. Cell Biol.* 2021. V. 25. Iss. 4. P. 828 – 849.
5. Kuznetsov N.B. Synthesis and application of carbon sorbents. *Soros. Obrazovat. Zhurn.* 1999. N 12. P. 29–34 (in Russian).
6. Kinle H. Active coals and their industrial application. L.: Khimiya. 1984. 216 p. (in Russian).
7. Pukhov I.G., Smirnova D.N., Ilyin A.P., Smirnov N.N. Study of the acid-base properties of the surface of carbon adsorbents by potentiometric titration. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2012. V. 55. N 12. P.117-122 (in Russian).
8. Kolyshkin D.A. Active coals. Means and methods of testing. L.: Khimiya. 1972. 56 p. (in Russian).
9. Olontsev V.F. Some trends in the production and use of activated carbons in the world economy. *Khim. Prom.* 2000. N 8. P. 7-14 (in Russian).
10. Greg S., Sing K. Adsorption, surface area, porosity. M.: Mir. 1984. 306 p. (in Russian).
11. Smith A. Applied IR spectroscopy. M.: Mir. 1982. 328 p. (in Russian).
12. Tzvetkov G., Mihaylova S., Stoitchkova K., Tzvetkov P., Spassov T. Mechanochemical and chemical activation of lignocellulosic material to prepare powdered activated carbons for adsorption applications. *Powder Technol.* 2016. V. 299. P. 41–50. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.05.033.
13. Ali R., Aslam Z., Shawabkeh R.A., Asghar A., Hussein I.A. BET, FTIR, and RAMAN characterizations of activated carbon from wasteoil fly ash. *Turk. J. Chem.* 2020. V. 44(2). P. 279–295. DOI: 10.3906/kim-1909-20.
14. Nabil M., Mahmoud K.R., El-Shaer A., Nayber H.A. Preparation of crystalline silica (quartz, cristobalite, and tridymite) and amorphous silica powder (one step). *J. Phys. Chem. Solids.* 2018. V. 121. P. 22–26. DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.05.001.

15. **El Maataoui Y., El M'rabet M., Maaroufi A., Dahchour A.** Spiramycin adsorption behavior on activated bentonite, activated carbon and natural phosphate in aqueous solution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. 26. P. 15953-15972. DOI: 10.1007/s11356-019-05021-4.
16. **Ravindra Reddy T., Kaneko S., Endo T., Lakshmi Reddy S.** Spectroscopic Characterization of Bentonite. *J. Laser Opt. Photonics.* 2017. V. 4(171). DOI: 10.4172/2469-410X.1000171.
17. **Mazo M.A., Tamayo A., Rubio J.** Advanced silicon oxycarbide-carbon composites for high-temperature resistant friction systems. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2016. 36(10). P. 2443-2452. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.03.012.
18. **Мельников А.А., Гордина Н.Е., Тюканова К.А., Гусев Г.И., Гушин А.А., Румянцев Р.Н.** Синтез сорбционных систем на основе механохимически активированного вермикулита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 63-71. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6422.
19. **Grishin I.S., Smirnov N.N., Smirnova D.N.** Mechanochemical Modification of Activated Carbon in Air. *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. 93. P. 1661-1666. DOI: 10.1134/S1070427220110051.
15. **El Maataoui Y., El M'rabet M., Maaroufi A., Dahchour A.** Spiramycin adsorption behavior on activated bentonite, activated carbon and natural phosphate in aqueous solution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019. 26. P. 15953-15972. DOI: 10.1007/s11356-019-05021-4.
16. **Ravindra Reddy T., Kaneko S., Endo T., Lakshmi Reddy S.** Spectroscopic Characterization of Bentonite. *J. Laser Opt. Photonics.* 2017. V. 4(171). DOI: 10.4172/2469-410X.1000171.
17. **Mazo M.A., Tamayo A., Rubio J.** Advanced silicon oxycarbide-carbon composites for high-temperature resistant friction systems. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2016. 36(10). P. 2443-2452. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.03.012.
18. **Melnikov A.A., Gordina N.E., Tyukanova K.A., Gusev G.I., Gushchin A.A., Rummyantsev R.N.** Synthesis of sorption systems based on mechanochemically activated vermiculite. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 8. P. 63-71. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6422.
19. **Grishin I.S., Smirnov N.N., Smirnova D.N.** Mechanochemical Modification of Activated Carbon in Air. *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. 93. P. 1661-1666. DOI: 10.1134/S1070427220110051.

Поступила в редакцию 18.05.2023
Принята к опубликованию 29.06.2023

Received 18.05.2023
Accepted 29.06.2023