

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ФУЛЛЕРЕНА НА СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУЛЛЕРЕНАМИ АКТИВНЫХ УГЛЕЙ

Е.А. Спиридонова, В.Ю. Морозова, М.Л. Подвязников, В.В. Самонин

Елена Анатольевна Спиридонова *, Вера Юрьевна Морозова, Михаил Львович Подвязников, Вячеслав Викторович Самонин

Кафедра «Химии и технологии материалов и изделий сорбционной техники», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Московский пр., д. 26, Санкт-Петербург, Россия, 190013

E-mail: spiridonova_elena@live.ru*, vera_nikonova@mail.ru, sorbent@lti-gti.ru, samonin@lti-gti.ru

В работе показано влияние параметров процесса модифицирования активного угля фуллеренами на их защитные характеристики. Параметры работы адсорбента оценивали по времени защитного действия слоя адсорбента в условиях различной влажности паровоздушного потока. Модифицирование адсорбента проводилось с использованием водных растворов фуллеренов, полученных с применением ультразвукового диспергатора. При этом фиксировалось изменение оптической плотности коллоидных водных растворов фуллеренов в зависимости от продолжительности диспергирования. Показано, что при длительной обработке достигается постоянное значение оптической плотности получаемых растворов. Причем такие растворы обладают относительной седиментационной устойчивостью в течение 120 мин, что достаточно для проведения процесса импрегнирования активного угля фуллеренами. Оптимальная продолжительность ультразвуковой обработки составила 15 мин (трехкратная обработка при продолжительности каждой 5 мин). При такой обработке достигается оптимальное распределение агломератов фуллеренов в объеме воды. Время защитного действия активного угля, модифицированного полученным раствором, превосходит время работы исходного активного угля практически на 50% в условиях высокой влажности и на 10% в условиях невысокой относительной влажности воздуха. Такой эффект связан с повышением дисперсионного взаимодействия между бензолом и активным углем и снижением величины адсорбции паров воды в результате гидрофобизации поверхности. Дополнительная УЗ-обработка на стадии импрегнирования приводит к нивелированию данного эффекта. В то же время, интенсивное перемешивание активного угля с раствором фуллерена способствует более равномерному распределению и закреплению модификатора в адсорбенте, и как следствие, увеличению времени защитного действия в условиях различной влажности газовоздушного потока. Рекомендуется проводить импрегнирование активного угля раствором фуллеренов с последующим интенсивным перемешиванием активного угля и раствора модификатора.

Ключевые слова: адсорбция, водные растворы фуллеренов, модифицирование активных углей, импрегнирование, ультразвуковая обработка, время защитного действия, гидрофобность

EFFECT OF FULLERENE DISPERSION ON THE SORPTION PROPERTIES OF ACTIVATED CARBONS MODIFIED WITH FULLERENES

E.A. Spiridonova, V.Yu. Morozova, M.L. Podvyaznikov, V.V. Samonin

Elena A. Spiridonova*, Vera Yu. Morozova, Michael L. Podvyaznikov, Vyacheslav V. Samonin

Department of Chemistry and Technology of Materials and Products of Sorption Techniques, Saint-Petersburg State Institute of Technology, Moskovsky ave., 26, Saint Petersburg, 190013, Russia

E-mail: spiridonova_elena@live.ru*, vera_nikonova@mail.ru, sorbent@lti-gti.ru, samonin@lti-gti.ru

The article shows the influence of parameters of the process of modifying active carbon with fullerenes on their protective characteristics. The parameters of the adsorbent operation were estimated by the time of the protective action of the adsorbent layer in conditions of different humidity of the steam-air stream. Modification of the adsorbent was performed using aqueous solutions of fullerenes obtained using an ultrasonic dispersant. The change in the optical density of colloidal aqueous solutions of fullerenes was recorded depending on the duration of dispersion. It is shown that a constant value of the optical density of the resulting solutions is achieved during long-term processing. Moreover, such solutions have a relative sedimentation stability for 120 min, which is sufficient for the process of impregnation of active carbon with fullerenes with their use. The optimal duration of ultrasonic treatment was 15 min (three times each treatment with a duration of 5 min). With this treatment, the optimal distribution of fullerene agglomerates in the water volume is achieved. The time of protective action of the active carbon modified with the obtained solution exceeds the time of operation of the original active coal by almost 50% in high humidity conditions and by 10% in low relative humidity conditions. This effect is associated with an increase in the dispersion interaction between benzene and active carbon and a decrease in the amount of adsorption of water vapor as a result of hydrophobization of the surface. Additional ultrasound processing at the impregnation stage leads to the leveling of this effect. At the same time, intensive mixing of active coal with a fullerene solution contributes to a more uniform distribution and fixation of the modifier in the adsorbent, and as a result, increases the time of protective action in conditions of different humidity of the gas-air flow. It is recommended to impregnate the active carbon with a solution of fullerenes followed by intensive mixing of the active carbon and the modifier solution.

Key words: adsorption, aqueous solutions of fullerenes, modification of active carbons, impregnation, ultrasonic treatment, protective action time, hydrophobicity

Для цитирования:

Спиридонова Е.А., Морозова В.Ю., Подвязников М.Л., Самонин В.В. Влияние диспергирования фуллерена на сорбционные свойства модифицированных фуллеренами активных углей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 125–131

For citation:

Spiridonova E.A., Morozova V.Yu., Podvyaznikov M.L., Samonin V.V. Effect of fullerene dispersion on the sorption properties of activated carbons modified with fullerenes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 125–131

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения техносферной безопасности незаменимы сорбционные технологии. В настоящее время разрабатываются новые сорбенты на основе различного исходного сырья [1] и совершенствуются традиционные путем химических и физико-химических методов модифицирования [2–5] для получения сорбирующих материалов, обладающих высокими сорбционными и эксплуатационными характеристиками.

С развитием нанотехнологий широко стали применяться методы введения в материалы высокодисперсных добавок, обладающих высокими значениями поверхностных энергий и изменяющих свойства монокомпонентных и композиционных материалов [6–8]. Одной из подобных добавок являются фуллероидные материалы: фуллерены, астралены, нанотрубки, добавление которых при-

водит к изменению функциональных свойств материалов различного назначения [9–12].

Такой подход стали использовать при получении сорбентов и катализаторов, осуществляя закрепление дисперсных добавок на активной поверхности пористых материалов [13–16]. Введение фуллеренов в количестве, не превышающем 0,5 % (масс. д.), приводит к изменению адсорбционных и ионообменных свойств сорбентов [17]. Так, модифицированные фуллеренами активные угли обладают сорбционной емкостью по катионам металлов, органическим соединениям, значительно превосходящей исходные сорбенты. Введение фуллеренов осуществляли как из водного раствора, стабилизированного краун-эфирами, так и без использования стабилизаторов, но с применением ультразвукового диспергатора [18].

Цель данной работы – определить влияние диспергирования фуллеренов на сорбционную активность модифицированных активных углей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Модифицирование активных углей из водных растворов фуллеренов, как было показано ранее [18], можно осуществить с использованием органических стабилизаторов, позволяющих перевести фуллерены, нерастворимые в воде, в водный раствор или без использования химических агентов, но со стадией ультразвуковой обработки.

Методика модифицирования активных углей аналогична методике получения катализаторов с каталитическими добавками, нанесенными на поверхность пористых тел [19], и состояла из следующих этапов: получение водного раствора фуллерена путем ультразвукового (УЗ) диспергирования, пропитка активного угля в статических условиях, вылеживание с целью равномерного распределения добавки, термообработка при температуре 150°C. Содержание фуллерена в угле составило 40 мкг/г, соотношение объема пропиточного раствора к массе активного угля – 4 : 1. Для модифицирования использовался активный уголь марки СКТ-6.

Водный раствор фуллерена получали путем многократной обработки водно-фуллереновой системы на ультразвуковом диспергаторе УЗГ 13-0,1/22 (ООО «Ультразвуковая техника»). Концентрация фуллерена в растворе составила 10 мг/дм³. Продолжительность одной ультразвуковой (УЗ) обработки, сопровождавшейся нагревом раствора до 75–80°C – 5 мин. При этом визуально наблюдалось однородное по всему объему помутнение раствора.

Степень диспергирования фуллеренов в воде оценивали спектрофотометрическим методом (Спектрофотометр УФ-1100, «Shanghai Marada Instruments Co., Ltd») по изменению оптической плотности раствора. Определение оптической плотности водных растворов фуллерена проводили в интервале длин волн 280–450 нм. Дальнейшие измерения проводили при длине волны 450 нм.

Изменение сорбционных свойств модифицированных активных углей оценивали по времени защитного действия, пропуская паровоздушную смесь с исходной концентрацией паров бензола 17 мг/дм³ через слой активного угля высотой 5 см с удельной скоростью 1,5 дм³/мин·см² в соответствии с [20]. Исходную концентрацию и концентрацию бензола за слоем определяли с использованием анализатора-течеискателя АНТ-3М. Проскоковая концентрация составляла 5 мг/м³. Влажность определяли с использованием измерителя влажности Ивит-М.Т.

Как ранее было показано, одним из факторов, способствующих повышению сорбционных свойств пористых углеродных материалов [18], является изменение гидрофобности поверхности активных углей в результате модифицирования. Для оценки изменения гидрофобности γ в соответствии с методикой М.М.Дубинина [21], снимали изотерму адсорбции по парам воды. Затем строили касательную к адсорбционной ветви изотермы до пересечения с осью абсцисс. Чем при более высоком относительном давлении начинается подъем изотермы и происходит пересечение касательной с осью абсцисс, тем более гидрофобной поверхностью обладает сорбент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получение водных растворов фуллеренов является актуальной задачей для различных областей их применения. Существует несколько принципиально отличающихся подходов к получению растворов: перевод путем химических превращений фуллерена в водорастворимую форму, обработка с использованием стабилизаторов (каликсаренов, краун-эфиров), диспергирование механическим путем в жестких условиях.

Основная задача при модифицировании фуллеренами активного угля – равномерно распределить добавку по поверхности адсорбента. При этом использование ультразвукового диспергатора позволяет разрушить слабые межмолекулярные связи в структуре фуллерита (кубическая гранцентрированная решетка, в узлах которой находятся фуллерены) с образованием не крупных агломератов, то есть с образованием относительно устойчивого коллоидного раствора [22–24].

На первом этапе работы провели многократную обработку навески фуллерита в воде УЗ с определением оптической плотности в интервале длин волн 280–450 нм. Результаты представлены на рис. 1.

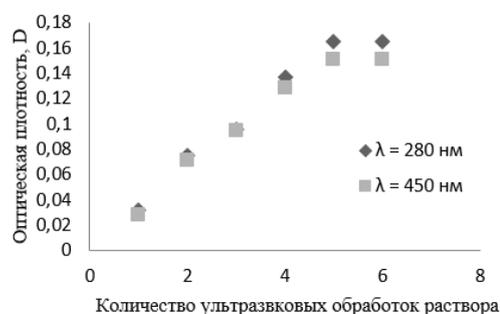


Рис. Изменение оптической плотности водного раствора фуллерена от кратности обработки УЗ

Fig. Change in optical density of an aqueous solution of fullerene from the multiplicity of ultrasonic treatment

При внесении навески фуллерита в воду оптическая плотность такого раствора в первый момент времени соответствует оптической плотности воды, так как модификатор, обладающий гидрофобными свойствами, находится на поверхности раздела фаз. При воздействии ультразвука (УЗ) в течение нескольких секунд фуллерен распределяется по объему раствора, приводя к появлению мутности. С увеличением кратности обработки достигается предельное значение оптической плотности, что характеризует максимально возможное распределение частиц в объеме воды в данных условиях диспергирования. Вид зависимостей идентичен для различных длин волн, при которых происходит определение оптической плотности. Причем, зависимость оптической плотности раствора от концентрации фуллерена в воде имеет линейный вид в диапазоне 0–80 мг/дм³, то есть соблюдается закон Бугера–Ламберта–Бера.

Такая обработка приводит к образованию коллоидного раствора [22], который вероятно относительно устойчив. В связи с этим, важной технологической характеристикой модифицирования активного угля является изменение оптической плотности раствора во времени (табл. 1). Данная характеристика остается практически постоянной при экспозиции раствора в течение 120 мин после трехкратной ультразвуковой обработки. Несмотря на то, что раствор модификатора после пятикратной обработки ультразвуком характеризуется более высокими значениями оптической плотности, он менее устойчив и склонен к агломерации, достигая через 120 мин тех же значений оптической плотности, что и трехкратно обработанный раствор.

Таблица 1

Изменение оптической плотности водного раствора фуллерена от времени экспозиции
Table 1. The change in optical density of an aqueous solution of fullerene from exposure time

Время отстаивания, мин	Оптическая плотность	
	3-кратная обработка УЗ	5-кратная обработка УЗ
0	0,098	0,165
5	0,097	0,140
60	0,096	0,100
120	0,094	0,090
1440	0,048	0,044

На следующем этапе провели модифицирование активных углей водными растворами фуллеренов, полученными в различных условиях, с последующим определением времени защитного действия слоя модифицированного активного угля.

Эксперимент проводили в условиях различной влажности газо-воздушного потока (табл. 2).

Ранее было показано, что введение фуллерена способствует увеличению времени защитного действия [18]. Особенно преимущества модифицированного угля заметны в условиях повышенной влажности, когда значительное влияние имеет конкурентная сорбция воды на активном угле.

Таблица 2

Влияние методики обработки водного раствора модификатора на гидрофобность и время защитного действия активного угля

Table 2. The influence of the treatment method of the aqueous solution of the modifier on the hydrophobicity and time of the protective action of activated carbon

Кратность обработок на УЗ-диспергаторе	Время защитного действия, мин		Гидрофобность Y
	$\varphi = 58\%$	$\varphi = 98\%$	
-	50	30	0,32
1	51	35	0,33
2	51	35	–
3	54	43	0,47
4	55	44	–
5	55	43	0,49

Как видно из результатов, представленных в табл. 2, введение фуллерена в количестве 40 мкг/г в активный уголь повышает на 47 % время защитного действия по парам бензола из потока воздуха с относительной влажностью $\varphi = 98\%$, а в условиях потока с относительной влажностью $\varphi = 58\%$ на 10%. Такой эффект влияния фуллеренов на активный уголь описывался ранее [17, 18] и обусловлен влиянием фуллерена на дисперсионное взаимодействие между активным углем и неполярными молекулами бензола с его повышением. В это же время снижается избирательность поверхности активного угля к полярным молекулам воды, что косвенно подтверждается повышением гидрофобности поверхности активного угля (Y). Следует отметить, что такой эффект возрастает при увеличении количества ультразвуковых обработок, которым был подвержен раствор фуллерена. Из приведенных результатов видно, что в качестве оптимальной подготовки раствора можно считать трехкратную УЗ обработку, позволяющую достичь наибольших положительных изменений времени защитного действия модифицированного угля. Дальнейшая обработка хоть и приводит к увеличению оптической плотности раствора, то есть, вероятно, повышает степень диспергирования фуллерена в воде, но не ведет к увеличению времени защитного

действия, так как 5-кратная УЗ обработка способствует не только диспергированию фуллерена в растворе, но и повышает его склонность к агрегации. Поэтому в качестве оптимального метода приготовления водного раствора фуллерена с концентрацией 10 мг/дм^3 путем УЗ диспергирования можно считать 3-кратную обработку продолжительностью 5 мин каждая в условиях эксперимента.

Влияние диспергирования различных добавок на свойства материалов прослеживается не только на примере физической адсорбции, но и при протекании хемосорбции. Так в работе [25] показано, что введение диспергированной меди в активный уголь повышает его сорбционную емкость по аммиаку в 3,5–4,5 раза за счет формирования на поверхности углеродного носителя кристаллитов активной добавки значительно меньших размеров.

Так как не происходит снижения оптической плотности раствора в течение 120 мин (табл. 1), то можно считать, что в течение заданного периода раствор остается относительно устойчивым, а фуллерен находится в виде максимально диспергированных агломератов, эффективных для пропитки активного угля. В то же время для равномерного распределения добавки по поверхности активного угля необходимо проводить длительное импрегнирование с последующим вылеживанием материала. Поэтому на следующем этапе система «раствор фуллерена – активный уголь» подвергалась совместной трехкратной ультразвуковой обработке, общей продолжительностью 15 мин, с дальнейшим перемешиванием в течение 72 ч. Результаты представлены в табл. 3. Водные растворы фуллеренов предварительно были подвержены трехкратной обработке на ультразвуковом диспергаторе.

Обработка ультразвуком системы «раствор фуллерена – активный уголь» приводит к снижению времени защитного действия при невысоких влажностях по сравнению с активным углем, импрегнированным раствором фуллеренов, без дополнительных внешних воздействий. В то же время при высокой влажности наблюдается эффект гидрофобизации поверхности такого активного угля (табл. 1), так как время защитного действия несколько выше, чем для исходного угля. То есть можно предположить, что ультразвуковая обработка на стадии пропитки снижает взаимодействие между фуллереном и поверхностью активного угля, приводя к уменьшению дисперсионного взаимодействия.

Интенсивное механическое перемешивание смеси активного угля с раствором фуллерена

способствует равномерному распределению добавки фуллерена, при отсутствии эффекта его агрегирования, по активной поверхности углеродного адсорбента, что повышает эффект воздействия микродобавки на модифицируемый материал. Такой прием, как видно из табл. 2, ведет к увеличению времени защитного действия по парам бензола в условиях влажного воздуха.

Таблица 3

Влияние метода импрегнирования активного угля водным раствором фуллерена на время защитного действия в условиях газоздушного потока различной влажности

Table 3. The influence of the method of impregnation of activated carbon with an aqueous solution of fullerene on the time of the protective action in the conditions of gas-air flow of various humidity

Содержание фуллерена, мкг/г	Способ импрегнирования		Время защитного действия, мин		
	УЗ-диспергатор	Перемешивание	$\varphi = 58$ %	$\varphi = 75$ %	$\varphi = 98$ %
0	–	–	50	39	30
40	–	–	54	46	43
40	+	–	50	41	35
40	–	+	58	55	45
40*	+	+	58	55	47

Примечание: * Обработка ультразвуком и последующее перемешивание

Note: * Sonication and subsequent stirring

ВЫВОДЫ

Варьирование условий модифицирования активного угля водным раствором фуллерена позволяет увеличить эффективность его работы в динамических условиях по парам бензола.

Показано, что трехкратная ультразвуковая обработка водно-фуллереновой смеси общей продолжительностью 15 мин позволяет получить однородную водную коллоидную систему с концентрацией фуллерена 10 мг/дм^3 , устойчивую в течение 120 мин.

Установлено, что импрегнирование активного угля перемешиванием с водным раствором фуллерена, полученным с использованием ультразвукового воздействия, позволяет увеличить время защитного действия исходного адсорбента на 57 % в условиях относительной влажности воздуха $\varphi = 98$ %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание 785.00.X6019).

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment 785.00.X6019).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухин В.М., Клущин В.Н. Производство и применение углеродных адсорбентов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2012. 308 с.
2. Пьянова Л.Г., Дроздов В.А., Седанова А.В., Дроздецкая М.С., Глыздова М.В., Кравченко Е.А. Синтез модифицированных углеродных сорбентов и исследование их антиоксидантных свойств. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2018. Т. 54. № 6. С. 544-548. DOI: 10.1134/S0044185618060219.
3. Кулюхин С.А., Горбачева М.П., Красавина Е.П., Румер И.А. Модифицированные сорбенты на основе активированного угля БАУ-А и крупнопористого силикагеля для извлечения радионуклидов и цветных металлов из водных растворов. *Радиохимия*. 2019. Т. 61. № 1. С. 18-26. DOI: 10.1134/S0033831119010040.
4. Никифорова Т.Е., Козлов В.А. Механизм извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов химически модифицированной целлюлозой. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2012. Т. 48. № 6. С. 527-534.
5. Помазкина О.И., Филатова Е.Г., Пожидаев Ю.Н. Антибактериальные свойства модифицированных алюмосиликатов. *Химия и технология воды*. 2018. Т. 40. № 4. С. 376-384.
6. Пшеничный Г.Н., Галкин Ю.Ю. О механизме действия высокодисперсных минеральных добавок. *Технологии бетонов*. 2014. № 11. С. 41-45.
7. Шахов С.А., Николаев Н.Ю. Улучшение формовкости керамических масс на основе пылеватых суглинков введением композиционной высокодисперсной добавки. *Техника и технология силикатов*. 2017. Т. 24. № 2. С. 7-13.
8. Шашок Ж.С., Прокопчук Н.Р., Вишневецкий К.В., Крауклис А.В., Борисевич К.О., Борисевич И.О. Особенности реологических свойств резиновых смесей с высокодисперсными углеродными добавками. *Инженерно-физический журнал*. 2018. Т. 91. № 1. С. 156-161.
9. Алексеева О.В., Багровская Н.А. Свойства растворов и пленок гидрокси-этилцеллюлозы, модифицированной фуллереном. *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2010. № 3 (33). С. 5-10.
10. Попова О.И., Глебов В.А., Глебов А.В. Использование фуллеренов для повышения механической прочности композиционных магнитов. *Цветные металлы*. 2010. № 12. С. 60-63.
11. Глебов В.А., Бакулина А.С., Ефремов И.В., Щетинин И.В., Ягодкин Ю.Д., Глезер А.М., Рашковский А.Ю., Вайнштейн Д.Л. Исследование структуры стали 12Х12М1БФР, модифицированной добавками фуллеренов и углеродных нанотрубок. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 7 (661). С. 30-33.
12. Витязь П.А., Шпилевский Э.М. Фуллерены в матрицах различных веществ. *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85. № 4. С. 718-724.
13. Дьячкова Т.Ю., Климов Е.С., Давыдова О.А., Бузаева М.В., Макарова И.А., Кривошеева Я.Э., Судьин Ю.И., Подольская З.В. Модифицирование природного цеолита углеродными нанотрубками для улучшения сорбционных свойств. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия*. 2018. Т. 10. № 3. С. 5-15. DOI: 10.14529/chem180301
14. Галль Л.Н., Меленевская Е.Ю., Подосенова Н.Г., Шаронова Л.В. Влияние фуллерена на адсорбционные свойства силикагеля по отношению к компонентам плазмы крови. *Эфферентная терапия*. 2010. Т. 16. № 2. С. 15-18.

REFERENCES

1. Mukhin V.M., Klushin V.N. Production and use of carbon adsorbents. M.: RCHTU D.I. Mendeleev. 2012. 308 p. (in Russian).
2. Pyanova L.G., Drozdov V.A., Sedanova A.V., Drozdetskaya M.S., Glyzdova M.V., Kravchenko E.A. Synthesis of modified carbon sorbents and a study of their antioxidant properties. *Prot. Metals Phys. Chem. Surf.* 2018. V. 54. N 6. P. 1010-1014. DOI: 10.1134/S2070205118060217.
3. Kulyukhin S.A., Gorbacheva M.P., Krasavina E.P., Rumer I.A. Modified Sorbents Based on BAU-A Activated Carbon and Coarsely Porous Silica Gel for Removing Radionuclides and Nonferrous Metals from Aqueous Solutions. *Radiochemistry*. 2019. V. 61. N 1. P. 18-27. DOI: 10.1134/S1066362219010041.
4. Nikiforova T.E., Kozlov V.A. A mechanism of sorption of heavy metal ions from aqueous solutions by chemically modified cellulose. *Prot. Metals Phys. Chem. Surf.* 2012. V. 48. N 6. P. 620-626. DOI: 10.1134/S207020511206007X
5. Pomazkina O.I., Filatova E.G., Pozhidaev Yu.N. Antibacterial properties of modified aluminosilicates. *J. Water Chem. Technol.* 2018. V. 40. N 4. P. 196-200. DOI: 10.3103/S1063455X18040033
6. Pshenichny G.N., Galkin Yu.Yu. About the mechanism of highly dispersive mineral supplements action. *Concrete Technol.* 2014. N. 11. P. 41-45 (in Russian).
7. Shachov S.A., Nikolaev N.Yu. The improvement of molding properties to the charges based on silty loam by the introduction of highly dispersed composite additives. *Techniq. Technol. Silicates*. 2017. V. 24. N 2. P. 7-13 (in Russian).
8. Shashok Z.S., Prokopchuk N.R., Vishnevskii K.V., Krauklis A.V., Borisevich K.O., Borisevich I.O. Rheological Properties of Rubber Compounds with Finely Divided Carbon Additives. *J. Eng. Phys. Thermoph.* 2018. T. 91. N 1. P. 146-151. DOI: 10.1007/s10891-018-1728-9
9. Alekseeva O.V., Bagrovskaya N.A. Properties of solutions and films of hydroxyethyl cellulose modified with fullerene. *Zhid. Krystals Prakt. Isp.*. 2010. N. 3 (33). P. 5-10 (in Russian).
10. Popova O.I., Glebov V.A., Glebov A.V. Enhancement of composite magnets mechanical strength by using of fullerenes. *Non-ferrous Metals*. 2010. N. 12. P. 60-63 (in Russian).
11. Glebov V.A., Bakulina A.S., Efremov I.V., Shchetinin I.V., Yagodkin Yu. D., Glezer A.M., Rashkovskii A. Yu., Vainshtein D.L. A study of the structure of steel 12Kh12M1BFR modified with additives of fullerenes and nanotubes. *Metallurg. Tepl. Obr. Metal.* 2010. N. 7 (661). P. 30-33 (in Russian).
12. Vityaz' P.A., Shpilevskii E.M. Fullerenes in matrices of different substances. *J. Eng. Phys. Thermoph.* 2012. V. 85. N 4. P. 780-787. DOI: 10.1007/s10891-012-0714-x
13. Dyachkova T.Yu., Klimov E.S., Davydova O.A., Buzaeva M.V., Makarova I.A., Krivosheeva Y.E., Sudin Yu.I., Podolskaya Z.V. Modification of natural zeolite by carbon nanotubes for an improvement in the sorption properties. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Chemistry*. 2018. V. 10. N. 3. P. 5-15 (in Russian).
14. Gall L.N., Melenevskaya E.Yu., Podosenova N.G., Sharonova L.V. Effect of fullerene on adsorption properties of silica gel with respect to blood plasma components. *Efferent Therapy*. 2010. V. 16. N. 2. P. 15-18 (in Russian).
15. Alekseeva O.V., Bagrovskaya N.A., Noskov A.V., Kuznetsov V.V. Structural and adsorption properties of polystyrene modified with fullerene. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh.*

15. **Алексеева О.В., Багровская Н.А., Носков А.В., Кузнецов В.В.** Структурные и адсорбционные свойства полистирола, модифицированного фуллереном. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2012. Т. 55. № 10. С. 108-111.
16. **Алексеева О.В., Багровская Н.А., Носков А.В.** Сорбционная активность композита целлюлоза/фуллерен по отношению к ионам тяжелых металлов. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2019. Т. 55. № 1. С. 18-24. DOI: 10.1134/S0044185619010029
17. **Самонин В.В., Подвязников М.Л., Никонова В.Ю., Спиридонова Е.А., Шевкина А.Ю.** Сорбирующие материалы, изделия, устройства и процессы управляемой адсорбции. СПб.: Наука, 2009. 270 с.
18. **Спиридонова Е.А., Хрылова Е.Д., Самонин В.В., Подвязников М.Л., Яковлева А.В., Кича М.А.** Очистка влажных газовых сред от бензола активными углями, модифицированными фуллеренами. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2019. Т. 55. № 2. С. 209-214. DOI: 10.1134/S0044185619020281
19. **Фенелонов В.Б.** Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 413 с.
20. ГОСТ 17218-71 Угли активные. Метод определения времени защитного действия по бензолу. Введ. 1973. М.: Издательство стандартов. 1988. 15 с.
21. **Дубинин М.М.** Сорбция и структура активных углей. Исследование сорбции водяных паров. *Журнал физической химии*. 1947. Т. 21. Вып. 8. С. 1373-1491.
22. **Хохряков А.А., Кизима О.А., Булавин Л.А., Лен А., Авдеев М.В., Аксёнов В.Л.** Коллоидная структура и механизм стабилизации водных растворов немодифицированного фуллерена C₆₀. *Кристаллография*. 2007. Т. 52. № 3. С. 509-514.
23. **Гринюк И.И., Прилуцкая С.В., Слободяник Н.С., Чунихин А.Ю., Матышевская О.П.** Агрегатное состояние C₆₀-фуллерена в различных средах. *Biotechnologia Acta*. 2013. Т. 6. № 6. С. 071-076.
24. **Scharff P., Risch K., Carta-abelmann L., Dmytruk I.M., Bilyi M.M., Durov S.S., Golub O.A., Khavryuchenko A.V., Buzaneva E.V., Aksenov V.L., Avdeev M.V., Prylutsky Yu.I.** Structure of C₆₀ fullerene in water: spectroscopic data. *Carbon*. 2004. V. 42. P. 1203-1206. DOI: 10.1016/j.carbon.2003.12.053.
25. **Фарберова Е.А., Тингаева Е.А., Кузьминых К.Г., Смирнов С.А.** Усовершенствование технологии получения углеродного хемпоглотителя аммиака. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 9. С. 117-123. DOI: 10.6060/ivkkt.20196209.5946
- Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*] 2012. V. 55. N. 10. P. 108-111 (in Russian).
16. **Alekseeva O.V., Bagrovskaya N.A., Noskov A.V.** The Sorption Activity of a Cellulose–Fullerene Composite Relative to Heavy Metal Ions. *Protec. Metals Phys. Chem. Surf.* 2019. V. 55. N 1. P. 15-20. DOI: 10.1134/S2070205119010027.
17. **Samonin V.V., Podvyaznikov M.L., Nikonova V.Yu., Spiridonova E.A., Shevkina A.Yu.** Sorbent materials, products, devices and processes of controlled adsorption. St. Petersburg: Nauka, 2009. 270 p. (in Russian).
18. **Spiridonova E.A., Khrylova E.D., Samonin V.V., Podvyaznikov M.L., Yakovleva A.V., Kicha M.A.** Cleaning of Humidified Gas Media from Benzene Using Active Carbons Modified by Fullerenes. *Protec. Metals Phys. Chem. Surf.* 2019. V. 55. N 2. P. 335-340. DOI: 10.1134/S2070205119020278.
19. **Fenelonov V.B.** Introduction to the physical chemistry of the formation of the supramolecular structure of adsorbents and catalysts. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, 2002. 413 p. (in Russian).
20. GOST 17218-71 Active coals. Method for determining the benzene protective action time. Enter 1973. M.: Publishing house of standards. 1988. 15 p.
21. **Dubin M.M.** Sorption and structure of activated carbons. Study of sorption of water vapor. *Zhurn. Fiz. Khim.* 1947. V. 21. N 8. P. 1373-1491 (in Russian).
22. **Khokhryakov A.A., Kyzyma O.A., Avdeev M.V., Aksenov V.L., Bulavin L.A., Len A.** Colloidal structure and stabilization mechanism of aqueous solutions of unmodified fullerene C₆₀. *Crystal. Reports*. 2007. V. 52. N 3. P. 487-491. DOI: 10.1134/S1063774507030273
23. **Grynyuk I.I., Prylutska S.V., Slobodyanik N.S., Chunikhin O.Yu., Matyshevskaya O.P.** The aggregate state of C₆₀-fullerene in various media. *Biotechnol. Acta*. 2013. V. 6. N. 6. P. 071-076.
24. **Scharff P., Risch K., Carta-abelmann L., Dmytruk I.M., Bilyi M.M., Durov S.S., Golub O.A., Khavryuchenko A.V., Buzaneva E.V., Aksenov V.L., Avdeev M.V., Prylutsky Yu.I.** Structure of C₆₀ fullerene in water: spectroscopic data. *Carbon*. 2004. V. 42. P. 1203-1206. DOI: 10.1016/j.carbon.2003.12.053.
25. **Farberova E. A., Tingaeva E. A., Kuzminykh K. G., Smirnov S. A.** Improvement of process for production of carbon chemical absorber for ammonia. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2019. V. 62. N 9. P. 117-123. DOI: 10.6060/ivkkt.20196209.5946

Поступила в редакцию 12.01.2021
Принята к опубликованию 02.09.2021

Received 12.01.2021
Accepted 02.09.2021