

АДСОРБЦИЯ ПАРОВ БЕНЗОЛА, АЦЕТОНА И ТЕТРАХЛОРМЕТАНА НА МИКРОПОРИСТОМ УГЛЕРОДНОМ АДСОРБЕНТЕ ФАС-3

Д.С. Зайцев, А.В. Твардовский, А.В. Школин, А.А. Фомкин

Дмитрий Сергеевич Зайцев, Андрей Викторович Твардовский*

Тверской государственной технической университет, Наб. Афанасия Никитина, 22, Тверь, Российская Федерация, 170026

E-mail: zaytsev.d.s@mail.ru, tvardovskiy@tstu.tver.ru*

Андрей Вячеславович Школин, Анатолий Алексеевич Фомкин

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский пр., 31, корп. 4, Москва, Российская Федерация, 119071

E-mail: shkolin@bk.ru, fomkinaa@mail.ru

В настоящей работе проведено исследование адсорбции паров органических веществ (бензол, четыреххлористый углерод, ацетон) на микропористом углеродном адсорбенте ФАС-3 в области давлений от 0,1 Па до 0,1 МПа и температур от 293 до 313 К, показавшее достаточно высокие адсорбционные характеристики использованного адсорбента по сравнению с традиционными поглотителями. Микропористый углеродный адсорбент ФАС-3 является достаточно новым и до сих пор не до конца изученным. Целью данного исследования было определение параметров адсорбента ФАС-3, а также изучение процессов адсорбции паров различных органических веществ на нем. В работе был использован микропористый углеродный адсорбент ФАС-3, полученный на основе фурфурола. Получение сферических гранул адсорбента ФАС-3 осуществлялось в результате жидкостного формования сополимера фурфурола и эпоксидной смолы на основе принципиально нового процесса совмещения стадий осмоления мономера, формования смеси в сферический продукт и отверждения гранул. Активацию сферических зерен ФАС-3 осуществляли во вращающейся печи смесью водяного пара и углекислого газа при температуре 850–900 °С до обгара, что соответствовало развитию пористости в адсорбенте. Равновесные величины адсорбции паров веществ на ФАС-3 были измерены на гравиметрической вакуумной установке, разработанной в ИФХЭ РАН. Регенерацию адсорбента проводили в течение 6 ч при температуре 623 К до давления 0,1 Па. Максимальная абсолютная погрешность измерения составила $\pm 0,01$ ммоль/г с доверительной вероятностью 95 %. Измерение давлений паров органических веществ в пределах 0,13 Па–0,31 МПа осуществляли манометрами абсолютно давления М10, М1000, разработанными и изготовленными в ИФХЭ РАН. Погрешность измерения давлений манометром М10 в интервале 0,13 до 1 330 Па составила $\pm 0,066$ Па, а манометром М1000 в интервале от 13 Па до 130 кПа была $\pm 4,0$ Па.

Ключевые слова: адсорбция, адсорбент, бензол, ацетон, четыреххлористый углерод, микропористый углеродный адсорбент

ADSORPTION OF BENZENE, ACETONE AND CARBON TETRACHLORIDE VAPORS ON MICROPOROUS CARBON ADSORBENT FAS-3

D.S. Zaytsev, A.V. Tvardovskiy, A.V. Shkolin, A.A. Fomkin

Dmitriy S. Zaytsev, Andrey V. Tvardovskiy*

Tver State Technical University. Emb. Afanasiya Nikitina, 22, Tver, 170026, Russia

E-mail: zaytsev.d.s@mail.ru, tvardovskiy@tstu.tver.ru*

Andrey V. Shkolin, Anatoliy A. Fomkin

Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS, Leninsky pr., 31, Bld. 4, Moscow, 119071, Russia

In this paper, the study of the adsorption of organic matter vapors (benzene, carbon tetrachloride, acetone) on the microporous carbon adsorbent FAS-3 in the region of pressures from 0.1 Pa to 0.1 MPa and temperatures from 293 to 313 K was conducted, which showed sufficiently high adsorption characteristics of the used adsorbent in comparison with traditional absorbers. Microporous carbon adsorbent FAS-3 is quite new and still not fully understood. The purpose of this study was to determine the parameters of the adsorbent FAS-3, as well as the study of the processes of vapor adsorption of various organic substances on it. The microporous carbon adsorbent FAS-3, obtained on the basis of furfural, was used in the work. Obtaining spherical granules of the adsorbent FAS-3 was carried out in the result of liquid molding of a copolymer of furfural and epoxy resin on the basis of a fundamentally new process of combining the stages of blending monomer, molding the mixture in spherical product of the cured pellets. The activation of spherical grains of FAS-3 was carried out in a rotary kiln by a mixture of water vapor and carbon dioxide at a temperature of 850-900°C to burning that was consistent with the development of porosity in the adsorbent. The equilibrium values of vapor adsorption of substances on FAS-3 were measured on the gravimetric vacuum unit developed in the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences. Regeneration of the adsorbent was carried out for 6 h at a temperature of 623 K to a pressure of 0.1 Pa. The maximum absolute measurement error was ± 0.01 mmol / g with 95% confidence. Measurement of vapor pressure of organic substances within 0.13 Pa-0.13 MPa was carried out by absolute pressure gauges M10, M1000, developed and manufactured in the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences. The pressure measurement error by the manometer M10 in the range of 0.13 to 1330 Pa was ± 0.066 Pa, and the manometer M1000 in the range from 13 Pa to 130 kPa was ± 4.0 Pa.

Key words: adsorption, adsorbent, benzene, acetone, carbon tetrachloride, microporous carbon adsorbent

Для цитирования:

Зайцев Д.С., Твардовский А.В., Школин А.В., Фомкин А.А. Адсорбция паров бензола, ацетона и тетрахлорметана на микропористом углеродном адсорбенте ФАС-3. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 52–57

For citation:

Zaytsev D.S., Tvardovskiy A.V., Shkolin A.V., Fomkin A.A. Adsorption of benzene, acetone and carbon tetrachloride vapors on microporous carbon adsorbent FAS-3. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 7. P. 52–57

ВВЕДЕНИЕ

Совершенно очевидно, что 21 век знаменует для человечества новую эру – эру защиты биосферы, и в технологиях глубокой и санитарной очистки самых различных производственных выбросов ведущая роль будет принадлежать активным углям.

Область применения адсорбционных технологий с использованием активных углей интенсивно развивается и активно исследуется в настоящее время [1-19], что в значительной степени обусловлено тремя обстоятельствами: во-первых, активные угли обеспечивают возможность получения в целом ряде производств продукции высокой чистоты; во-вторых, эти адсорбенты способствуют внедрению в производство многих технологий повышенной интенсивности и, в-третьих, они позволяют эффективно решать наиболее острые проблемы защиты биосферы от вредных выбросов.

Так, микропористый углеродный адсорбент ФАС-3 является достаточно новым и ещё недостаточно изученным. Целью данных исследований было определение параметров адсорбента ФАС-3, а также изучение процессов адсорбции паров различных органических веществ на нем. В

частности, была изучена адсорбция ацетона, бензола и тетрахлорметана. Полученные данные могут быть использованы, например, для оценки эффективности применения данного адсорбента при адсорбции паров этих достаточно вредных веществ.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микропористый углеродный адсорбент ФАС-3

В работе был использован микропористый углеродный адсорбент ФАС-3, полученный на основе фурфурола. Данный адсорбент представляет собой гладкие твердые гранулы округлой формы.

Получение сферических гранул адсорбента ФАС-3 осуществлялось в результате жидкостного формования сополимера фурфурола и эпоксидной смолы на основе принципиально нового процесса совмещения стадий осмоления мономера, формования смеси в сферический продукт и отверждения гранул.

Активацию сферических зерен ФАС-3 осуществляли во вращающейся печи смесью водяного пара и углекислого газа при температуре 850-900 °С до обгара, что соответствовало развитию пористости в адсорбенте.

Активные угли на основе реактопластов марок ФАС существенно превосходят серийно-выпускаемые углеродные адсорбенты на основе каменного угля и на основе торфа по своим прочностным свойствам и низкому содержанию золы при значительно большем развитии объема адсорбирующих микропор.

В результате анализа изотермы адсорбции стандартного пара бензола были получены следующие характеристики адсорбента: удельный объем микропор – $W_0 = 0,51 \text{ см}^3/\text{г}$; характеристическая энергия адсорбции бензола – $E_0 = 23,9 \text{ кДж/моль}$; средняя эффективная полуширина микропор – $x_0 = 0,5 \text{ нм}$.

В табл. 1 приведены рассчитанные характеристики адсорбента ФАС-3 в сравнении с аналогичными характеристиками других известных адсорбентов.

Таблица 1

Сравнение параметров адсорбентов
Table 1. Comparison of adsorbent parameters

№	Марка	E , кДж/моль	x_0 , нм
1	ФАС	23,9	0,5
2	Еврокарб	24,7	0,49
3	AR1	21,9	0,55

Использованные адсорбаты

В качестве адсорбатов были использованы высокочистые вещества с чистотой 99,98%, которые в соответствии с [20] обладают следующими физико-химическими характеристиками:

Бензол: молекулярный вес $M = 78,108$; критическая температура $T_{кр} = 562,45 \text{ К}$; критическое давление $p_{кр} = 4,92 \text{ МПа}$; критическая плотность $\rho_{кр} = 304 \text{ кг/м}^3$; температура кипения $T_{кип} = 353,1 \text{ К}$.

Ацетон: молекулярный вес $M = 58,1$; критическая температура $T_{кр} = 508 \text{ К}$; критическое давление $p_{кр} = 4,76 \text{ МПа}$; критическая плотность $\rho_{кр} = 273 \text{ кг/м}^3$; температура кипения $T_{кип} = 329,1 \text{ К}$.

Четыреххлористый углерод: молекулярный вес $M = 153,8$; критическая температура $T_{кр} = 556,2 \text{ К}$; критическое давление $p_{кр} = 4,56 \text{ МПа}$; критическая плотность $\rho_{кр} = 588 \text{ кг/м}^3$; температура кипения $T_{кип} = 349,7 \text{ К}$.

В табл. 2 приведены кинетические диаметры молекул исследуемых адсорбатов.

Таблица 2

Сравнение кинетических диаметров молекул адсорбатов
Table 2. Comparison of the kinetic diameters of the adsorbate molecules

№	Вещество	Химическая формула	Кинетический диаметр молекулы, Å
1	Ацетон	C_3H_6O	4,7
2	Бензол	C_6H_6	5,9
3	Тетрахлорметан	CCl_4	6,0

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Равновесные величины адсорбции паров веществ на ФАС-3 были измерены на гравиметрической вакуумной установке, разработанной в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН). Измерения проводились в интервале давлений от 0,1 Па до 0,1 МПа и температур от 273 до 353 К. Адсорбцию паров органических веществ измеряли на полуавтоматической адсорбционной весовой вакуумной установке. При проведении эксперимента была использована навеска адсорбента массой 0,28 г. Регенерацию адсорбента проводили в течение 6 ч при температуре 623 К до давления 0,1 Па. Максимальная абсолютная погрешность измерения, определенная по методике, приведенной в [21], составила $\pm 0,01 \text{ ммоль/г}$ с доверительной вероятностью 95%.

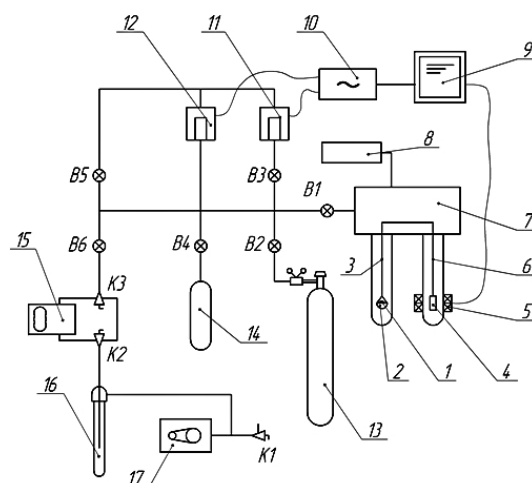


Рис. 1. Схема адсорбционно-вакуумной гравиметрической установки. 1 – адсорбент; 2 – чашечка весов; 3 – тяга весов; 4 – противовес; 5 – электромагнит; 6 – тяга противовеса; 7 – электронные весы; 8 – блок электрической компенсации веса; 9 – самописец КСП-4; 10 – электронный регистрирующий блок; 11 – манометр М10; 12 – манометр М1000; 13 – баллон и система редукторов с исследуемым газом; 14 – ампула с исследуемой жидкостью и паром; 15 – диффузионный насос; 16 – азотная ловушка; 17 – форвакуумный насос; К1 – К3 – стеклянные краны; В1 – В6 – вакуумные вентили

Fig. 1. Scheme of adsorption and gravimetric vacuum installation. 1 – adsorbent; 2 – a cup of weights; 3 – draft scales; 4 – balances; 5 – an electromagnet; 6 – draft of the counterweight; 7 – electronic scales; 8 – shunt compensation weight; 9 – KSP-4 recorder; 10 – electronic recording unit; 11 – gauge M10; 12 – gauge M1000; 13 – cylinder and system of gears with the test gas; 14 – ampoule with test liquid and vapor; 15 – diffusion pump; 16 – nitrogen trap; 17 – foreline pump; K1 – K3 – glass cranes; B1 – B6 – vacuum valves

Измерение давлений паров органических веществ в пределах 0,13 Па-0,13 МПа осуществляли манометрами абсолютного давления М10, М1000, разработанными и изготовленными в

ИФХЭ РАН. Погрешность измерения давлений манометром М10 в интервале 0,13 до 1330 Па составила $\pm 0,066$ Па, а манометром М1000 в интервале от 13 Па до 130 кПа составляла $\pm 4,0$ Па.

На рис. 1 представлена схема адсорбционно-вакуумной гравиметрической установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2-4 представлены соответственно изотермы равновесной адсорбции паров бензола, ацетона и тетрахлорметана микропористым углеродным адсорбентом ФАС при различных температурах.

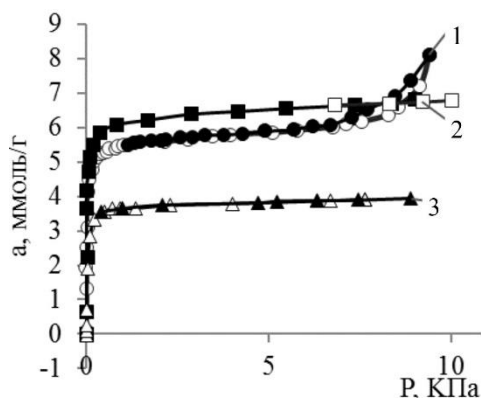


Рис. 2. Изотермы адсорбции (светлые маркеры) и десорбции (черные маркеры) паров бензола на микропористых углеродных адсорбентах ФАС-3 (1), AR-1 (2) и Еврокарб (3) при 293 К
Fig. 2. Adsorption (white markers) and desorption (black markers) isotherms of benzene vapors on microporous carbon adsorbents FAS-3 (1), AR-1 (2) and Eurocarb (3) at 293 K

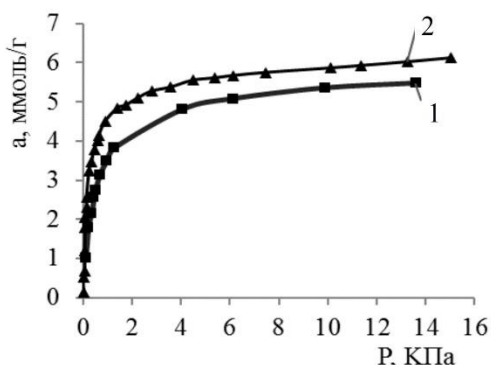


Рис. 3. Изотермы адсорбции паров ацетона на ФАС-3 при 313 (1) и 293 К (2)
Fig. 3. Adsorption isotherms of acetone vapors on FAS-3 at 313 (1) and 293 K (2)

Общим для всех представленных изотерм является следующее. В начальной части изотерм в области малых давлений наблюдается резкий подъем, что свидетельствует о преобладании достаточно однородной микропористой структуры адсорбента. Затем, в средней части изотерм, вели-

чина адсорбции достаточно мало изменяется с ростом давления. Это объясняется некоторой небольшой неоднородностью адсорбента и заполнением молекулами адсорбата более широких микропор. При повышенных давлениях, близких к давлению насыщенного пара, наблюдается подъем изотерм (рис. 2), обусловленный капиллярной конденсацией в мезопорах адсорбента. В этой области адсорбции мы также видим наличие петли гистерезиса, что характерно для этого процесса.

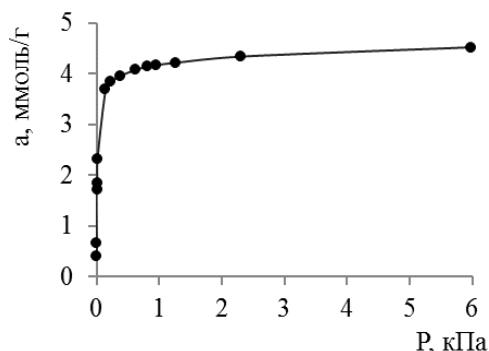


Рис. 4. Изотерма адсорбции паров тетрахлорметана на ФАС-3 при 293 К

Fig. 4. Adsorption isotherm of carbon tetrachloride vapors on FAS-3 at 293 K

Является совершенно понятным тот факт, что изотермы адсорбции при более низких температурах лежат выше изотерм для более высоких температур. Это классический пример физической адсорбции.

Сравнительный анализ (рис. 2) адсорбции паров органических веществ микропористым углеродным адсорбентом ФАС-3, адсорбентами AR-1 и Еврокарб подчеркивает достаточно высокие адсорбционные свойства адсорбента ФАС-3 для его эффективной работы, например, по удалению паров вредных и опасных веществ из окружающей среды.

ВЫВОДЫ

В настоящее время потребители испытывают дефицит высококачественных активных углей с высокой адсорбционной емкостью. Основными потребителями углеродных адсорбентов является производство пищевых продуктов (42%), технологическое использование (38%), охрана окружающей среды (10%). Велика роль использования активных углей для водоподготовки, в химическом синтезе, процессах извлечения золота и ряда других драгоценных металлов и др.

В настоящей работе на оригинальной гравиметрической установке, разработанной в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрум-

кина РАН, проведено исследование адсорбции паров органических веществ (бензол, четыреххлористый углерод, ацетон) на достаточно новом и малоизученном микропористом углеродном адсорбенте ФАС-3, полученном на основе фурфурола, в области давлений от 0,1 Па до 0,1 МПа и температур от 293 до 313 К, показавшее высокие адсорбционные характеристики использованного адсорбента по сравнению с традиционными поглотителями.

Например, максимальная величина адсорбции паров бензола на адсорбенте ФАС-3 была поч-

ти в два раза больше, чем на широко известном адсорбенте Eurocarb при $T = 293$ К.

В результате анализа изотермы адсорбции стандартного пара бензола при 293 К с помощью расчетного аппарата теории объемного заполнения микропор были получены следующие важнейшие характеристики адсорбента: удельный объем микропор – $W_0 = 0,51$ см³/г; характеристическая энергия адсорбции бензола – $E_0 = 23,9$ кДж/моль; средняя эффективная полуширина микропор – $x_0 = 0,5$ нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красильникова О.К., Казбанов Н.С., Гурьянов В.В. Влияние температуры на адсорбцию фенола микропористыми активированными углями типа ФАС. *Физикохим. пов-ти и защита матер.* 2009. Т. 45. № 5. С. 467-473.
2. Фомкин А.А., Синицын В.А., Гурьянов В.В. Адсорбция водорода в нанопористых углеродных адсорбентах, полученных термохимическим синтезом на основе фурфурола. *Коллоид. журн.* 2008. Т. 70. № 3. С. 408-412.
3. Фомкин А.А., Меньщиков И.Е., Прибылов А.А., Гурьянов В.В., Школин А.В., Зайцев Д.С., Твардовский А.В. Адсорбция метана на микропористом углеродном адсорбенте с широким распределением пор по размерам. *Коллоид. журн.* 2017. Т. 79. № 1. С. 96-103.
4. Меньщиков И.Е., Фомкин А.А., Школин А.В., Стриженов Е.М., Зайцев Д.С., Твардовский А.В. Энергетика адсорбции метана на микропористых углеродных адсорбентах. *Физикохим. пов-ти и защита матер.* 2017. Т. 53. № 5. С. 459-464.
5. Ибрагимова Р.И., Гребенников С.Ф., Гурьянов В.В., Воробьев-Десятковский Н.В., Кубышкин С.А. Определение характеристик пористой структуры углеродных адсорбентов с широким распределением микропор по размерам. *Журн. физич. химии.* 2012. Т. 86. № 5. С. 941-946.
6. Харитонов А.Г., Красильникова О.К., Варганян Р.Ш., Буланова А.В. Адсорбция некоторых азотсодержащих соединений и производных бензола из водных растворов на активных углях. *Коллоид. журн.* 2005. Т. 67. № 3. С. 416-420.
7. Цивадзе А.Ю., Гурьянов В.В., Петухова Г.А. Получение, свойства и перспективы применения сферических активных углей на основе фурфурола в народном хозяйстве и медицине. *Физикохим. пов-ти и защита матер.* 2011. Т. 47. № 5. С. 508-516.
8. Петухова Г.А. Анализ микропористой структуры углеродных адсорбентов в рамках теории объемного заполнения микропор. *Физикохим. пов-ти и защита матер.* 2008. Т. 44. № 2. С. 170-176.
9. Мухин В.М. Роль активных углей в экологии добычи, транспортировки и переработки нефти и газа. *Безопасность труда в пром-ти.* 2018. № 3. С. 29-34.
10. Мухин В.М. Экологические аспекты применения активных углей. *Экология и пром-ть России.* 2014. № 12. С. 52-56.
11. Меньщиков И.Е., Фомкин А.А., Цивадзе А.Ю., Школин А.В., Стриженов Е.М., Пулин А.Л. Адсорбция метана на микропористых углеродных адсорбентах в области сверхкритических температур. *Физикохим. пов-ти и защита матер.* 2015. Т. 51. № 4. С. 345-350.

REFERENCES

1. Krasilnikova O.K., Kazbanov N.S., Guryanov V.V. Temperature effect on phenol adsorption by microporous activated carbons of FAS type. *Fizikokhim. Pov-ti Zashchita Mater.* 2009. V. 45. N 5. P. 467-473 (in Russian). DOI: 10.1134/S2070205109050037.
2. Fomkin A.A., Sinitsyn V.A., Guryanov V.V. Hydrogen adsorption in nanoporous carbon adsorbents obtained by thermochemical synthesis based on furfural. *Kolloid. Zhurn.* 2008. V. 70. N 3. P. 408-412 (in Russian).
3. Fomkin A.A., Menschikov I.E., Pribylov A.A., Guryanov V.V., Shkolin A.V., Zaytsev D.S., Tvardovskiy A.V. Methane adsorption on a microporous carbon adsorbent with a wide pore size distribution. *Kolloid. Zhurn.* 2017. V. 79. N 1. P. 96-103 (in Russian).
4. Menschikov I.E., Fomkin A.A., Shkolin A.V., Strizhenov E.M., Zaytsev D.S., Tvardovskiy A.V. Energy of methane adsorption on microporous carbon adsorbents. *Fizikokhim. Pov-ti Zashchita Mater.* 2017. V. 53. N 5. P. 459-464 (in Russian).
5. Ibragimova R.I., Grebennikov S.F., Guryanov V.V., Vorobyev-Desyatovskiy N.V., Kubyshekin S.A. Characterization of porous structure of carbon adsorbents with a wide distribution of micropore sizes. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2012. V. 86. N 5. P. 941-946 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024412050147.
6. Kharitonova A.G., Krasilnikova O.K., Vartapetyan R.Sh., Bulanov A.V. Adsorption of some nitrogen-containing compounds and benzene derivatives from aqueous solutions on active coals. *Kolloid. Zhurn.* 2005. V. 67. N 3. P. 416-420 (in Russian). DOI: 10.1007/s10595-005-0107-3.
7. Zivadze A.Yu., Guryanov V.V., Petukhova G.A. Analysis of the microporous structure of carbon adsorbents in the framework of the theory of bulk filling of micropores. *Fizikokhim. Pov-ti Zashchita Mater.* 2011. V. 47. N 5. P. 508-516 (in Russian).
8. Petukhova G.A. Analysis of the microporous structure of carbon adsorbents in the framework of the theory of volume filling of micropores. *Fizikokhim. Pov-ti Zashchita Mater.* 2008. V. 44. N 2. P. 170-176 (in Russian). DOI: 10.1134/S0033173208020082.
9. Mukhin V.M. The role of active coals in the ecology of oil and gas production, transportation and processing. *Bezopasnost Truda Prom-ti.* 2018. N 3. P. 29-34 (in Russian). DOI: 10.24000/0409-2961-2018-3-29-34.
10. Mukhin V.M. Environmental aspects of the use of active coals. *Ekologiya Prom-t' Rossii.* 2014. N 12. P. 52-56 (in Russian).
11. Menschikov I.E., Fomkin A.A., Zivadze A.Yu., Shkolin A.V., Strizhenov E.M., Pulin A.L. Methane adsorption on microporous carbon adsorbents at supercritical temperatures. *Fizikokhim. Pov-ti Zashchita Mater.* 2015. V. 51. N 4. P. 345-350 (in Russian). DOI: 10.1134/S2070205115040243.

12. **Школин А.В., Фомкин А.А., Синицын В.А.** Адсорбция метана на микропористом углеродном адсорбенте АУК. *Коллоид. журн.* 2008. Т. 70. № 6. С. 849-854.
13. **Набиулин В.В., Фомкин А.А., Твардовский А.В.** Адсорбция четыреххлористого углерода на микропористом углеродном адсорбенте АР-В. *Физикохим. пов-ти и защита матер.* 2011. Т. 47. № 2. С. 136-139.
14. **Школин А.В., Фомкин А.А., Яковлев В.Ю.** Анализ изостер адсорбции газов и паров на микропористых адсорбентах. *Изв. Акад. наук. Сер. хим.* 2007. № 3. С. 380-385.
15. **Фомкин А.А., Цивадзе А.Ю., Школин А.В., Меньшиков И.Е., Пулин А.Л.** Исследование адсорбции и аккумуляции метана на микропористом углеродном адсорбенте в широком температурном интервале. *Физикохим. пов-ти и защита матер.* 2016. Т. 52. № 5. С. 456-464.
16. **Yakovlev V.Yu., Fomkin A.A., Tvardovski A.V.** Adsorption and deformation phenomena at the interaction of CO₂ and microporous carbon adsorbent. *J. Colloid Interf. Sci.* 2003. V. 268. P. 33-36.
17. **Yakovlev V.Yu., Tvardovski A.V., Fomkin A.A.** Adsorption and deformation phenomena at the interaction of N₂ and microporous carbon adsorbent. *J. Colloid Interf. Sci.* 2004. V. 280. P. 305-308.
18. **Tvardovskiy A.V.** Sorbent deformation. Amsterdam, Boston: Elsevier (Holland), Academic Press (USA). 2006. 286 p.
19. **Tvardovskiy A.V., Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Shkolin A.V., Zaytsev D.S.** Sorbostriction of AR - V carbon adsorbent in organic vapor adsorption. *Chem. Eng. Transact.* 2017. V. 57. P. 1483-1488.
20. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972. 720 с.
21. **Бурдун Г.Д., Марков Б.Н.** Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов. 1985. 256 с.
12. **Shkolin A.V., Fomkin A.A., Sinitsyn V.A.** Methane adsorption on the microporous carbon adsorbent AUK. *Kolloid. Zhurn.* 2008. V. 70. N 6. P. 849-854 (in Russian). DOI: 10.1134/S1061933X08060173.
13. **Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Tvardovskiy A.V.** Adsorption of carbon tetrachloride on microporous carbon adsorbent AR-V. *Fizikokhim. Pov-ti Zashchita Mater.* 2011. V. 47. N 2. P. 136-139 (in Russian).
14. **Shkolin A.V., Fomkin A.A., Yakovlev B.U.** Analysis izoster adsorption of gases and vapors on microporous adsorbents. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Khim.* 2007. N 3. P. 380-385 (in Russian). DOI: 10.1007/s11172-007-0064-6.
15. **Fomkin A.A., Zivadze A.Yu., Shkolin A.V., Menschikov I.E., Pulin A.L.** Study of adsorption and accumulation of methane on a microporous carbon adsorbent in a wide temperature interval. *Fizikokhim. Pov-ti Zashchita Mater.* 2016. V. 52. N 5. P. 456-464 (in Russian). DOI: 10.1134/S2070205116050075.
16. **Yakovlev V.Yu., Fomkin A.A., Tvardovski A.V.** Adsorption and deformation phenomena at the interaction of CO₂ and microporous carbon adsorbent. *J. Colloid Interf. Sci.* 2003. V. 268. P. 33-36. DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00696-9.
17. **Yakovlev V.Yu., Tvardovski A.V., Fomkin A.A.** Adsorption and deformation phenomena at the interaction of N₂ and microporous carbon adsorbent. *J. Colloid Interf. Sci.* 2004. V. 280. P. 305-308. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.07.029.
18. **Tvardovskiy A.V.** Sorbent deformation. Amsterdam, Boston: Elsevier (Holland), Academic Press (USA). 2006. 286 p.
19. **Tvardovskiy A.V., Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Shkolin A.V., Zaytsev D.S.** Sorbostriction of AR - V carbon adsorbent in organic vapor adsorption. *Chem. Eng. Transact.* 2017. V. 57. P. 1483-1488.
20. **Vargaftik N.B.** Reference book on thermophysical properties of gases and liquids. M.: Nauka. 1972. 720 p. (in Russian).
21. **Burdun G.D., Markov B.N.** Fundamentals of metrology. M.: Izd-vo Standartov. 1985. 256 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 03.07.2018
 Принята к опубликованию (Accepted) 05.03.2019