

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

**АДСОРБЦИОННАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МИКРОПОРИСТОГО  
УГЛЕРОДНОГО АДСОРБЕНТА ФАС ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ  
НЕГО ПАРОВ ВОДЫ И АЦЕТОНА**

Дмитрий Сергеевич Зайцев, Андрей Викторович Твардовский \*

Тверской государственный технический университет, наб. Афанасия  
Никитина, 22, г. Тверь, Российская Федерация, 170026

E-mail: [zaytsev.d.s@mail.ru](mailto:zaytsev.d.s@mail.ru), [tvardovski@tstu.tver.ru](mailto:tvardovski@tstu.tver.ru) \*

Андрей Вячеславович Школин, Анатолий Алексеевич Фомкин

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
Ленинский просп., 31, корп. 4,

Москва, Российская Федерация, 119071

E-mail: [shkolin@bk.ru](mailto:shkolin@bk.ru), [fomkinaa@mail.ru](mailto:fomkinaa@mail.ru)

*Впервые проведены комплексные исследования адсорбционной деформации – сорбострикции микропористого углеродного адсорбента ФАС при адсорбции паров воды и ацетона из потока газа-носителя – азота в неравновесных условиях. Проанализированы результаты этого явления. В работе был использован микропористый углеродный адсорбент ФАС, полученный на основе фурфурола. 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 объёма адсорбирующих микропор. В работе использовали установку для исследования адсорбционной деформации твердых адсорбентов, изготовленную в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН. Для измерений применялся проточный дилатометр, позволяющий измерять адсорбционную деформацию адсорбента при пропускании через него порции исследуемого вещества или смеси в потоке газа-носителя. Показано, что время выхода кривых сорбострикции на максимум индивидуально для каждого из исследованных веществ, что позволяет*

*использовать эффект сорбострикции для выявления наличия определённых веществ в составе смеси. Результаты исследования волновой сорбострикции микропористого углеродного адсорбента ФАС при адсорбции паров ацетона и воды из потока газа-носителя азота позволяют сделать вывод о высокой селективности адсорбции и возможности использования адсорбента в качестве сенсора для контроля содержания этих веществ в потоке азота.*

**Ключевые слова:** адсорбция; адсорбент; сорбострикция; вода; ацетон.

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

**ADSORPTION DEFORMATION OF MICROPOROUS CARBON  
ADSORBENT FAS AT ADSORPTION OF WATER AND ACETONE  
VAPORS**

Dmitriy S. Zaytsev, Andrey V. Tvardovskiy \*

Tver State Technical University, Nab. 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 of RAS, Leninsky pr., 31,  
Bld. 4, Moscow, 119071, Russia

E-mail: shkolin@bk.ru, [fomkinaa@mail.ru](mailto:fomkinaa@mail.ru)

*For the first time, complex studies were carried out on adsorption deformation – sorbostriction of microporous carbon adsorbent FAS at adsorption of water and acetone vapors from the flow of carrier gas – nitrogen in non-equilibrium conditions. The results of this phenomenon were analyzed. In work a microporous carbon adsorbent FAS, obtained on the basis of furfural was used. Active coals on the basis of thermosetting plastics grades of FAS are significantly better than commercially-produced carbon adsorbents based on coal and peat on their mechanical properties and low ash content at a much*

*greater development of the volume of the adsorbent micropores. We used the facility for studies of adsorption deformation of a solid adsorbent, manufactured in the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS. For the measurements we used a flow dilatometer, allowing measuring the adsorption deformation of the adsorbent while passing through it portions of the test substance or mixture in the carrier gas flow. It is shown that exit time curves of barbastelle to the maximum is individually for each of the studied substances, which enables you to use the effect of barbastelle to detect the presence of certain substances in the mixture. The results of the wave sorbostriction of microporous carbon adsorbent FAS at adsorption of water and acetone vapors from the flow of carrier gas - nitrogen allow to conclude on the high selectivity of adsorption and the possibility of using the adsorbent as a sensor to control the content of these substances in a flow of nitrogen.*

**Key words:** adsorption; adsorbent; sorbostriction; water; acetone

## ВВЕДЕНИЕ

При адсорбции газов и паров твердые тела изменяют свои размеры. Однако развитию исследований в этом направлении долгое время мешали отсутствие теоретических представлений и большие экспериментально-методические трудности. Между тем изучение деформации твердых тел при адсорбции имеет большое значение как для развития термодинамики адсорбции, так и для практических целей.

В учении об адсорбции широко распространен метод описания адсорбционного равновесия, при котором роль твердого тела сводится только к созданию адсорбционного силового поля, в котором находится адсорбат. Сам адсорбент при этом считается термодинамически инертным. Очевидно, что анализ двухкомпонентной системы заменяют рассмотрением только одного компонента - адсорбата. Однако сам факт существования деформации твердого тела при адсорбции непосредственно указывает на недостаточную строгость описания адсорбционного равновесия на языке представлений об однокомпонентной системе.

Важнейшее физическое свойство адсорбентов - адсорбционная деформация [1-3] связана с изменением объемных и упругопластических свойств твердых тел. В литературе данное явление обозначают также понятиями адсорбционно-стимулированной деформации [4] и сорбострикции [5]. Адсорбционная деформация пористых твердых тел может оказывать существенное влияние на термодинамические функции адсорбционной системы, на обратимость адсорбционных процессов, а также на механические свойства адсорбента и, в частности, на его истираемость, разрушение, определять продолжительность работы в многоцикловых процессах.

Величина и знак адсорбционной деформации зависят как от химического состояния поверхности твердого тела и его пористости, так и от физико-химических свойств адсорбтива, температуры, концентрации, внешнего давления. Первые экспериментальные исследования адсорбционной деформации активных углей при адсорбции паров [6, 7] показали, что ее величина невелика, и не превышает нескольких десятых процента.

Исследованию адсорбционной деформации начали уделять большее внимание после опубликования работ [8-10], в которых было показано, что вклад адсорбционной деформации в термодинамические функции адсорбционных систем становится значимым в области высоких давлений. В настоящее время исследование адсорбционной деформации активно продолжается [11-20].

Учитывая достаточно большой объем экспериментальной информации по изучению адсорбционной деформации в равновесных условиях, представляется интересным и важным проведение исследований в неравновесных условиях.

В связи с этим, целью данной работы являлось установление закономерностей сорбострикции микропористого углеродного адсорбента

ФАС при адсорбции веществ разных классов и разного назначения в неравновесных условиях.

## ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### МИКРОПОРИСТЫЙ УГЛЕРОДНЫЙ АДсорбЕНТ ФАС

Исследуемый адсорбент должен иметь достаточно широкие поры и высокую энергию адсорбции для обеспечения высокой скорости адсорбционно-десорбционных процессов и выраженных деформационных эффектов.

В работе был использован микропористый углеродный адсорбент ФАС, полученный на основе фурфурола. 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 –  $x_0 = 0,5 \text{ нм}$ .

Для измерений волновой сорбострикции использовались гранулы адсорбента ФАС диаметром 3,2 мм с тщательно отшлифованными торцами, собранные в виде столбца высотой 190 мм.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ АДсорБАТЫ

В качестве адсорбатов были использованы высокочистые вещества с чистотой 99,98%, которые в соответствии с [21] обладают следующими физико-химическими характеристиками:

Ацетон: молекулярный вес  $M = 58,08$ ; критическая температура  $T_{кр} = 508,65$  К; критическое давление  $p_{кр} = 4,7$  МПа; критическая плотность  $\rho_{кр} = 273$  кг/м<sup>3</sup>; температура кипения  $T_{кип} = 329,15$  К.

Вода: молекулярный вес  $M = 18$ ; критическая температура  $T_{кр} = 647,15$  К; критическое давление  $p_{кр} = 22$  МПа; критическая плотность  $\rho_{кр} = 307$  кг/м<sup>3</sup>; температура кипения  $T_{кип} = 373$  К.

## ГАЗ-НОСИТЕЛЬ

В качестве газа – носителя использовали газ азот, поскольку величина его дифференциальной теплоты адсорбции на активных углях достаточно мала.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Адсорбент 1 (рис. 1) в виде столбца длиной 190 мм, составленного из цилиндрических гранул диаметра  $\approx 3,2$  мм и высотой  $\approx 4$  мм с отшлифованными торцевыми гранями, закладывался в трубку с перфорированной нижней частью 2. На него устанавливалась перфорированная опорная площадка 3, тяга 4 сердечника дифференциального трансформатора 5, направляющие 6, дифференциальный трансформатор 7. Дифференциальный трансформатор подключали к системе управления и контроля 10 и настраивали на необходимую точку рабочего диапазона [22]. Часть настроенного дилатометра с адсорбентом помещали в термостат 11 для обеспечения возможности измерения сорбострикции микропористого адсорбента в широком интервале температур. Термостатирование проточного дилатометра с чувствительным элементом осуществлялось при помощи электрического термостата, позволяющего поддерживать температуру с точностью  $\pm 0,2$  К.

После установления динамического равновесия в анализируемой среде в блок испаритель при температуре 493 К при помощи шприца объемом 1 мл вводились исследуемые вещества. Температуру испарителя

подбирали из условия возможности обеспечения полного испарения жидкости.

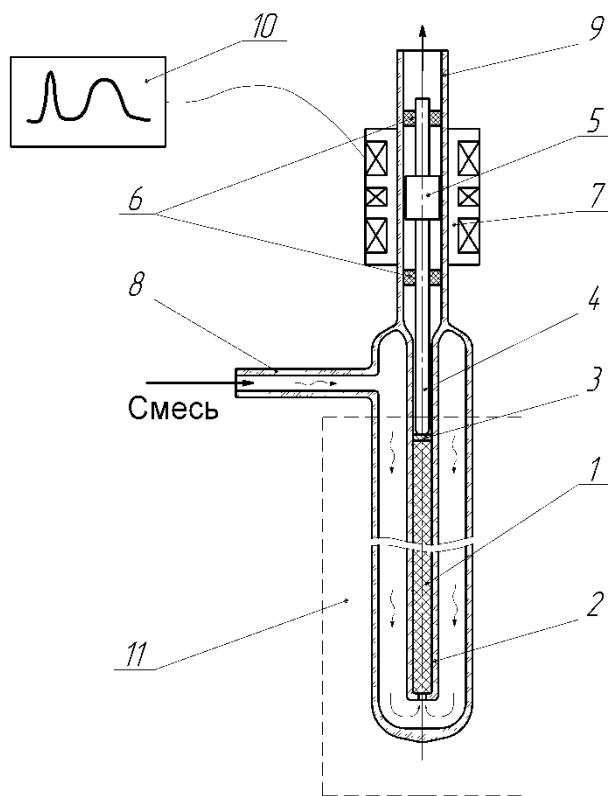


Рис. 1. Схема адсорбционного проточного дилатометра: 1 – адсорбент; 2 – трубка с перфорированной нижней частью; 3 – перфорированная опорная площадка; 4 – тяга; 5 – сердечник дифференциального трансформатора; 6 – направляющие; 7 – дифференциальный трансформатор; 8 – трубопровод, подводящий газ или жидкость – носитель с исследуемой пробой; 9 – отводящий трубопровод; 10 – органы управления и контроля; 11 – термостат.

Fig. 1. The scheme of adsorption flow dilatometer: 1 - adsorbent; 2 - tube with the perforated lower part; 3 - perforated base pad; 4 - rod; 5 - core of differential transformer; 6 - guides; 7 - differential transformer; 8 - the pipeline for gas or liquid media containing the studied probe; 9 - discharge pipe; 10 - the devices of management and control; 11 - the thermostat.

При попадании на адсорбент смеси анализируемого вещества и газа – носителя азота чувствительный элемент – микропористый адсорбент 1 деформировался. Зависимость деформации чувствительного элемента во времени регистрировали с помощью органов управления и контроля 10. Изменение линейных размеров адсорбента 1 приводило к перемещению штока 4 с сердечником 5 индуктивного преобразователя 7. Смена положения сердечника 5 вызывала изменение наведенных ЭДС во вторичных обмотках дифференциального трансформатора. На его обмотку возбуждения генератором ГЗ-117 подавался переменный электрический ток с напряжением 3 В и частотой 1 кГц. Изменение напряжения, возникающее во вторичных обмотках дифференциального трансформатора при перемещении сердечника, регистрировали с помощью цифрового вольтметра В7-38. Время эксперимента контролировали при помощи электронного секундомера. На основании отклика регистрировали волны адсорбционной деформации во времени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

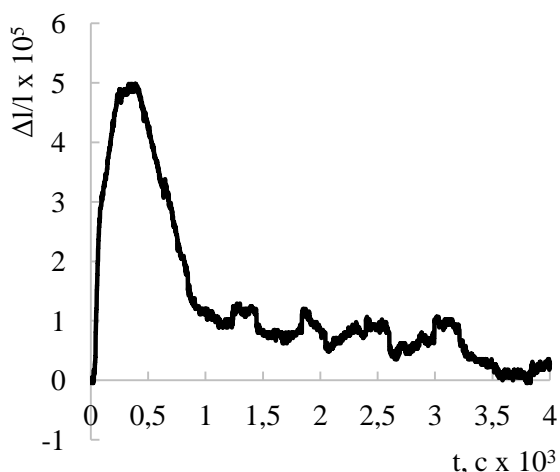


Рис. 2. Сорбострикция ацетона при температуре 560 К.

Количество вводимого вещества – 0,5 мл

Fig. 2. Sorbostriction of acetone at the temperature of 560 K.

The amount of the injected substance is 0.5 ml



Как следует из рис. 2, адсорбент в течение первых 350 с резко расширяется на величину  $5 \times 10^{-5}$ . После чего деформация адсорбента в течение приблизительно 70 с остается без изменений.

Насыщение адсорбента адсорбатом приводит к увеличению внутреннего давления в микропорах и, как следствие, его быстрому расширению. После достижения максимума сорбострикции, за счет увеличения парциальной концентрации газа носителя, анализируемый компонент начинает постепенно вымываться, что приводит к постепенному понижению деформации и возвращению адсорбента к исходной величине механического напряжения.

Как следует из рис. 2, получаемый деформационный максимум несимметричен. Правая ветвь на кривой после пика больше, чем левая. Несимметричность пика сорбострикции, по-видимому, обусловлена торможением молекул адсорбата в микропорах, с одной стороны, из-за неизотермичности адсорбционно-десорбционного процесса, а, с другой стороны, неидентичностью молекулярно-ситовых эффектов из-за сжатия адсорбента при десорбции.

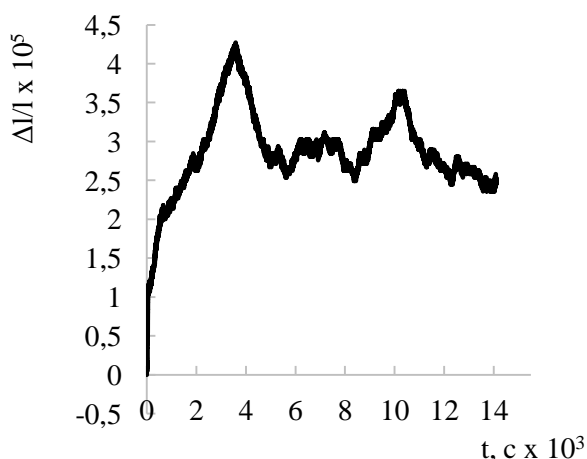


Рис. 3. Сорбострикция воды при температуре 560 К.

Количество вводимого вещества – 0,5 мл

Fig. 3. Sorbostriction of water at the temperature of 560 K.

The amount of the injected substance is 0.5 ml

Аналогичная кривая была получена и при адсорбции воды на микропористом углеродном адсорбенте ФАС (рис. 3). Однако время насыщения адсорбента водой, как и период вымывания адсорбированного вещества из пор значительно больше времён при адсорбции ацетона, что обусловлено меньшим размером молекул воды и большей энергетикой адсорбционного процесса; размер молекулы воды составляет приблизительно 0,29 нм [23] против 0,75 нм [24] у ацетона. Два пика на кривой сорбострикции воды могут быть обусловлены бимодальностью адсорбента.

## ВЫВОДЫ

Адсорбенты находят все более широкое распространение при создании различных композиционных материалов в разных отраслях промышленности, системах защиты человека и окружающей среды. С целью обеспечения требуемого качества конечного продукта возникает необходимость в учете различных физических параметров высокодисперсных систем, в частности, адсорбционной деформации (сорбострикции) последних при взаимодействии с газами и парами.

Впервые проведен комплекс исследований сорбострикции микропористого углеродного адсорбента ФАС при адсорбции паров воды и ацетона из потока газа-носителя - азота в неравновесных условиях.

Показано, время выхода кривых сорбострикции на максимум - индивидуально для каждого из исследованных веществ, что позволяет использовать эффект сорбострикции для выявления наличия определенных веществ в составе смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Фомкин А. А., Пулин А. Л.** Адсорбционная деформация цеолита NaX при высоких давлениях ксенона. *Известия РАН. Сер. хим.* 1996. № 2. С. 336-338.
2. **Красильникова О.К., Сарылова М.Е., Фалко Л.А.** Температурная зависимость сорбционной деформации. *Известия АН СССР. Сер. хим.* 1992. № 1. С. 23-28.
3. **Tvardovskiy A.V.** Sorbent Deformation. Academic Press: Amsterdam, Boston, London etc. 2006. 286 p.
4. **Школин А.В., Фомкин А.А.** Деформация микропористого углеродного адсорбента АУК, стимулированная адсорбцией метана. *Коллоид. журн.* 2009. Т. 71. № 1. С.116-121.
5. **Русанов А.И.** Механохимические явления в микропористых телах. *Журн. общ. химии.* 2006. Т. 76. № 1. С. 7-12.
6. **Bangham D.H., Fakhoury N.** The Expansion of Charcoal Accompanying Sorption of Gases and Vapours. *Nature.* 1928. N 122. P. 681-687.
7. **Meehan F.T.** The Expansion of Charcoal on Sorption of Carbon Dioxide. *Proc. Roy. Soc.* 1927. A115. P.199-205.
8. **Бакаев В.А.** Молекулярная теория физической адсорбции. Дис. ... д.ф.-м.н. М.: МГУ. 1989. 351 с.
9. **Шеховцова Л.Г., Фомкин А. А., Бакаев В.А.** Статистическая термодинамика адсорбционного равновесия для цеолитов в рамках ячеечной модели. *Изв. АН СССР. Сер. хим.* 1987. № 10. С. 2347-2350.
10. **Gusev V., Fomkin A.** High-Pressure Adsorption of Xe on NaX Zeolite by Microcalorimetry and Isothermic Analysis. *J. Colloid Interface Sci.* 1994. V. 162. P. 279-283.
11. **Меньщиков И.Е., Школин А.В., Фомкин А.А.** Измерения адсорбционной и термической деформаций микропористых углеродных адсорбентов. *Измерительная техника.* 2017. № 10. С. 58-62.

12. **Набиулин В.В., Фомкин А.А., Школин А.В., Твардовский А.В.** Волновая сорбострикция рекуперационного углеродного адсорбента AP-B при адсорбции паров органических веществ. Физикохимия поверхности и защита материалов. 2015. Т. 51. № 1. С. 16. DOI: 10.7868/S0044185615010106
13. **Школин А.В., Фомкин А.А.** Описание адсорбционно-стимулированной деформации микропористых адсорбентов на основе обобщенного потенциала межмолекулярного взаимодействия б–п. Физикохимия поверхности и защита материалов. 2016. Т. 52. № 2. С. 135-141.
14. **Набиулин В.В., Фомкин А.А., Твардовский А.В.** Адсорбционная деформация микропористого углеродного адсорбента AP-B при адсорбции н-гексана. Журнал физической химии. 2011. Т. 85. № 11. С. 2100-2104.
15. **Школин А.В., Фомкин А.А.** Адсорбционная деформация микропористого углеродного адсорбента АУК при адсорбции н-гептана. Физикохимия поверхности и защита материалов. 2013. Т. 49. № 4. С. 345. DOI: 10.7868/S004418561304013X
16. **Твардовский А.В., Набиулин В.В., Фомкин А.А.** Модель и уравнение адсорбционной деформации микропористого адсорбента. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 3. С. 124-127.
17. **Заливин С.Н., Твардовский А.В., Клингер А.В., Фомкин А.А.** Расчет адсорбционной деформации микропористого адсорбента. Журнал физической химии. 2008. Т. 82. № 2. С. 398-400.
18. **Твардовский А.В., Набиулин В.В., Фомкин А.А.** Кинетика адсорбционной деформации гранулированного углеродного микропористого адсорбента при адсорбции углеводородов из потока газа-носителя. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 4. С. 17-19.

19. **Фомкин А.А., Школин А.В., Петухова Г.А.** Волновая сорбострикция волны адсорбционной деформации микропористого адсорбента. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2012. Т. 48. № 2. С. 138.
20. **Школин А.В., Фомкин А.А., Сеницын В.А.** Адсорбционно-стимулированная деформация микропористого углеродного адсорбента АУК при адсорбции н-пентана. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2011. Т. 47. № 5. С. 451-457.
21. **Варгафтик Н.Б.**, Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
22. **Школин А.В.**, Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. М.: ИФХ РАН, 2008, с. 226.
23. **Шевченко А.А.**, Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии: Учебное пособие для вузов. М.: Химия, : КолосС, 2006 . 248 с.
24. **Стрижевский И.И.**, Технологические основы и безопасность производства газообразного и растворенного ацетилена. Л.: Химия, 1968. 308 с.

#### REFERENCES

1. **Fomkin A.A., Pulin A.L.** Adsorption deformation of zeolite at xenon high pressure. *Izvestiya RAN. Ser. Khim.* 1996. N 2. P. 336-338 (in Russian). DOI: 10.1007/bf02494738.
2. **Krasilnikova O.K., Sarylova M.E., Falko L.A.** Temperature dependence of sorption deformation. *Izvestiya AN SSSR Ser. khim.* 1992. N 1. P. 23-28 (in Russian).
3. **Tvardovskiy A.V.** Sorbent Deformation. Academic Press: Amsterdam, Boston, London etc. 2006. 286 p.

4. **Shkolin A.V., Fomkin A.A.** Deformation of microporous carbon adsorbent AUK stimulated with methane adsorption. *Kolloid. Zhurn.* 2009. V.71. N 1. P. 116-121 (in Russian).
5. **Rusanov A.I.** Mechanochemical phenomena in microporous bodies. *Zhurn. Obshch. Khimii.* 2006. V. 76. N 1. P. 712 (in Russian).
6. **Bangham D.H., Fakhoury N.** The Expansion of Charcoal Accompanying Sorption of Gases and Vapours. *Nature.* 1928. N 122. P. 681-687. DOI: 10.1038/122681b0.
7. **Meehan F.T.** The Expansion of Charcoal on Sorption of Carbon Dioxide. *Proc. Roy. Soc.* 1927. A115. P. 199-205. DOI: 10.1098/rspa.1927.0085.
8. **Bakaev V.A.** Molecular theory of physical adsorption. Dissertation for doctor degree on fiz.-mat. sciences. M.: MSU. 1989. 351 p. (in Russian).
9. **Shekhovtsova L.G., Fomkin A.A., Bakaev V.A.** Statistical thermodynamic of adsorption equilibrium for zeolites in a frame of cell model. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Khim.* 1987. N 10. P. 2347-2350 (in Russian).
10. **Gusev V., Fomkin A.** High-Pressure Adsorption of Xe on NaX Zeolite by Microcalorimetry and Isothermic Analysis. *J. Colloid Interface Sci.* 1994. V. 162. P. 279-283. DOI: 10.1006/jcis.1994.1040.
11. **Men'shchikov I.E., Shkolin A.V., Fomkin A.A.** Izmereniya adsorbtsionnoj i termicheskoj deformacij mikroporistyh uglerodnyh adsorbentov. *Izmeritel'naya tekhnika.* 2017. № 10. P. 58-62. (in Russian)
12. **Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Shkolin A.V., Tvardovskij A.V.** Volnovaya sorbostrikiya rekuperacionnogo uglerodnogo adsorbenta AR-V pri adsorbtsii parov organicheskikh veshchestv. *Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov.* 2015. V. 51. № 1. P. 16. (in Russian)  
DOI: 10.7868/S0044185615010106
13. **Shkolin A.V., Fomkin A.A.** Description of Adsorption-Stimulated Deformation of Microporous Adsorbents Based on Generalized Potential of Intermolecular Interactions (6, n). *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces.* 2016. T. 52. № 2. C. 193-198.

14. **Nabiulin V.V., Fomkin A.A., Tvardovskij A.V.** Adsorbcionnaya deformaciya mikroporistogo uglerodnogo adsorbenta AR-V pri adsorbicii n-geksana. Zhurnal fizicheskoy himii. 2011. T. 85. № 11. S. 2100-2104. (in Russian)
15. **Shkolin A.V., Fomkin A.A.** Adsorbcionnaya deformaciya mikroporistogo uglerodnogo adsorbenta AUK pri adsorbicii n-heptana. Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov. 2013. V. 49. № 4. P. 345. (in Russian)  
DOI: 10.7868/S004418561304013X
16. **Tvardovskij A.V., Nabiulin V.V., Fomkin A.A.** Model' i uravnenie adsorbcionnoj deformacii mikroporistogo adsorbenta. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2014. V. 57. № 3. P. 124-127. (in Russian)
17. **Zalivin S.N., Tvardovsky A.V., Klinger A.V., Fomkin A.A.** Calculation of the adsorptive deformation of a microporous adsorbent. Russian Journal of Physical Chemistry A. 2008. T. 82. № 2. C. 325-327.
18. **Tvardovskij A.V., Nabiulin V.V., Fomkin A.A.** Kinetika adsorbcionnoj deformacii granulirovannogo uglerodnogo mikroporistogo adsorbenta pri adsorbicii uglevodorodov iz potoka gaza-nositelya. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2014. V. 57. № 4. P. 17-19. (in Russian)
19. **Fomkin A.A., Shkolin A.V., Petuhova G.A.** Volnovaya sorbostrikiya volny adsorbcionnoj deformacii mikroporistogo adsorbenta. Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov. 2012. V. 48. № 2. P. 138. (in Russian)
20. **Shkolin A.V., Fomkin A.A., Sinicyn V.A.** Adsorbcionno-stimulirovannaya deformaciya mikroporistogo uglerodnogo adsorbenta AUK pri adsorbicii n-pentana. Fizikohimiya poverhnosti i zashchita materialov. 2011. V. 47. № 5. P. 451-457. (in Russian)
21. **Vargaftik N.B.**, Handbook on heat-physical properties of gases and liquids. M.: Nauka, 1972. 720 p. (in Russian).

22. **Shkolin A.V.**, Dissert. kandidata himicheskikh nauk. M.: IKhF RAN, 2008, p. 226. (in Russian).
23. **Shevchenko A.A.**, Chemical resistance of non-metallic materials and corrosion protection: Textbook for universities. M.: Himiya, : KolosS, 2006. 248 p. (in Russian).
24. **Strizhevskij I. I.**, Technological bases and safety of production of gaseous and dissolved acetylene. L.: Himiya, 1968. 308 p. (in Russian)

Поступила в редакцию