



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9019

Адсорбция метана на графеновом аэрогеле

Анастасия Евгеньевна Меметова¹, Елена Анатольевна Нескоромная²,
Андрей Дмитриевич Зеленин¹, Александр Викторович Бабкин²,
Нариман Рустемович Меметов¹, Алена Владимировна Герасимова¹✉

¹Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

²Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва, Россия, alyona_gerasimova_92@mail.ru✉

Аннотация. Статья посвящена изучению адсорбции метана на графеновом аэрогеле в широком интервале давлений при температурах выше критической. В работе синтезирован углеродный наноструктурный материал, представляющий собой аэрогель на основе восстановленного оксида графена с применением сверхкритических методов обработки гидрогеля в среде изопропилового спирта. Полученный адсорбент обладает хорошо развитой пористой структурой ($S(\text{БЭТ})=657 \text{ м}^2/\text{г}$; $V(\text{ДФТ})=0.766 \text{ см}^3/\text{г}$), что создает хорошие перспективы его использования для адсорбции энергетически важных газов, в частности, метана. Благоприятным фактором для увеличения скорости адсорбции-десорбции в таких системах является большой объем мезопор с диаметрами $\sim 5.0 \text{ нм}$.

Изучена адсорбция метана на полученном графеновом аэрогеле при температурах 298.15, 303.15, 313.15 К и давлении до 100 бар. Максимальная величина адсорбции составила 7.31 ммоль/г при 100 бар и 298.15 К. Представлены результаты расчетов адсорбции метана на графеновом аэрогеле в области сверхкритических температур по теории объемного заполнения микропор М. М. Дубинина. Экспериментальные данные адсорбции метана на графеновом аэрогеле были проанализированы с использованием типовой модели адсорбции Дубинина-Радушкевича в интервале температур 298.15-313.13 К. Характеристическая энергия адсорбции исследуемого газа (метана) на графеновом аэрогеле находятся в диапазоне 5.47-5.64 кДж/моль, что говорит о том, что процесс адсорбции метана на графеновом аэрогеле относится к физической адсорбции. На основе полученных данных рассчитаны зависимости дифференциальных мольных теплот адсорбции метана на графеновом аэрогеле от величины адсорбции при температурах 298.15-313.15 К. Теплота адсорбции составила 24 кДж/моль при всех температурах, а затем падала до $\sim 9 \text{ кДж/моль}$ при $\sim 6 \text{ ммоль/г}$ (298.15 К) и при $\sim 4 \text{ ммоль/г}$ (303.15-313.15 К). Такой ход кривых теплоты адсорбции, вероятно, является следствием особенностей пористой структуры адсорбента – мультимодальностью структуры. С молекулярной точки зрения само падение теплоты адсорбции при высоких заполнениях, по-видимому, связано с нарастанием энергии отталкивания между молекулами в адсорбате на малых расстояниях.

Ключевые слова: адсорбция, метан, графеновый аэрогель, термодинамика, теплота адсорбции, пористая структура

Благодарности: работа выполнена в рамках стипендии Президента Российской Федерации (СП-1260.2021.1).

Для цитирования: Меметова А.Е., Нескоромная Е.А., Зеленин А.Д., Бабкин А.В., Меметов Н.Р., Герасимова А.В., Адсорбция метана на графеновом аэрогеле // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 1. С. 41-49. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9019>

Original article

Methane adsorption on graphene aerogel

Anastasia E. Memetova¹, Elena A. Neskromnaya², Andrey D. Zelenin¹,
Alexander V. Babkin², Nariman R. Memetov¹, Alena V. Gerasimova¹✉

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russia, alyona_gerasimova_92@mail.ru✉

²Joint Stock Company State Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet” (AO Giredmet), Moscow, Russia

Abstract. The article studies methane adsorption on graphene aerogel over a wide range of pressures at temperatures above the critical value. In this study, we synthesized a carbon nanostructured material, which was an aerogel based on reduced graphene oxide. It was produced by supercritical treatment of the hydrogel in an isopropyl alcohol medium. The obtained adsorbent had a well-developed porous structure ($S(\text{BET})=657 \text{ m}^2/\text{g}$; $V(\text{DFT})=0.766 \text{ cm}^3/\text{g}$). This means it has good potential to be used for the adsorption of gases that are good sources of energy, in particular, methane. A large volume of mesopores with diameters of $\sim 5.0 \text{ nm}$ is a favourable factor for increasing the adsorption-desorption rate in such systems.

We studied the adsorption of methane on the obtained graphene aerogel at temperatures of 298.15, 303.15, and 313.15 K and pressures up to 100 bar. The maximum adsorption value was 7.31 mmol/g at 100 bar and 298.15 K. This article presents the results of calculations of methane adsorption on graphene aerogel at supercritical temperatures based on the theory of micropore volume filling by M.M. Dubinin. Experimental data on methane adsorption on graphene aerogel were analysed using the standard Dubinin-Radushkevich adsorption model in the temperature range of 298.15-313.13 K. The characteristic energy of adsorption of the studied gas (methane) on the graphene aerogel was in the range of 5.47-5.64 kJ/mol. This means that the adsorption of methane on the graphene aerogel is a physical adsorption process. Based on the obtained data, we calculated how the differential molar heat of adsorption of methane on graphene aerogel depends on the adsorption value at temperatures in the range 298.15-313.15 K. The heat of adsorption was 24 kJ/mol at all temperatures and then dropped to 9 kJ/mol at 6 mmol/g (298.15 K) and at 4 mmol/g (303.15-313.15 K). Such shape of the adsorption heat curves was probably due to the peculiarities of the porous structure of the adsorbent, its multimodality. From the molecular point of view, the very decrease in the heat of adsorption at high filling level is apparently due to the increase in repulsion energy between molecules in the adsorbate at small distances.

Keywords: adsorption, methane, graphene aerogel, thermodynamics, heat of adsorption, porous structure

For citation: Memetova A.E., Neskromnaya E.A., Zelenin A.D., Babkin A.V., Memetov N.R., Gerasimova A.V. Methane adsorption on graphene aerogel. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(1): 41-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9019>

Введение

В последние десятилетия было проведено большое количество экспериментальных и теоретических исследований для разработки инновационных материалов для разделения, очистки или хранения газов, включая материалы на основе углерода [1, 2], цеолиты [3, 4], металлоорганические каркасы (MOF) [5] и так далее.

Среди всех вышеперечисленных материалов углеродный материал в качестве дешевых адсорбентов получил более широкое распространение из-за его хорошо развитой пористой структуры, высокой адсорбционной способности и превосходной термической стабильности [6, 7].

Природный газ является важным компонентом энергетической экономики, но для реализации его потенциала в транспортном секторе необходимо решить проблемы хранения природного газа на борту. Сжижение природного газа - энергоемкий и дорогостоящий криогенный процесс, и для достижения приемлемой плотности энергии путем сжатия природного газа требуется высокое давление, которое может быть опасным. Поэтому для хранения газа на борту подвижной техники требуются специальные дорогостоящие резервуары. Недорогие материалы на основе углерода, которые могут накапливать природный газ путем физической адсорбции, предлагают возмож-

ность увеличения емкости при более низких давлениях и, следовательно, снижают требования к оборудованию для хранения.

Понимание адсорбции метана имеет важное значение для процессов хранения и разделения природного газа. Физическая сорбция возникает, когда слабые физические взаимодействия между твердым адсорбентом и газом индуцируют образование локально уплотненного слоя адсорбата на твердой поверхности. Это взаимодействие сильно зависит от химического состава поверхности и структуры поверхности адсорбента [8-11]. Несмотря на то, что большинство существующих углеродных адсорбентов не соответствуют требованиям, предъявляемым к адсорбентам метана, тем не менее, важно исследовать адсорбцию метана на новом классе углеродных адсорбентов – аэрогелях. Их свойства поверхности и пор можно регулировать, что делает их привлекательными для широкого спектра применений, в том числе адсорбции. Кроме того, несмотря на то, что аэрогели могут использоваться в качестве адсорбентов метана, в литературе недостаточно исследований, посвященных адсорбции метана на этих материалах [12]. В связи с этим важной и актуальной задачей является исследование особенностей адсорбции метана на углеродном аэрогеле.

Экспериментальная часть

Материал, использованный в качестве адсорбента, представляет собой аэрогель на основе восстановленного оксида графена. Для получения данного материала в качестве исходных компонентов применяли: оксид графена (ОГ), полученный в ООО «НаноТехЦентр» (Тамбов); аскорбиновую кислоту ($C_6H_8O_6$); изопропиловый спирт (изопропанол, пропанол-2); калий углекислый (K_2CO_3); дистиллированную воду.

Синтез аэрогеля на основе восстановленного оксида графена производили в

несколько последовательных этапов: 1) водную дисперсию ОГ с массовой концентрацией 1% подвергали предварительной ультразвуковой обработке для снижения вязкости и разбивания агломератов; 2) для восстановления ОГ аскорбиновую кислоту предварительно растворяли в воде, после чего вносили в подготовленную водную дисперсию оксида графена; 3) полученную реакционную смесь выдерживали при температуре кипения ($100^\circ C$) в течение 2 часов на водяной бане; 4) полученный материал охлаждали, фильтровали и промывали дистиллированной водой до нейтрального значения рН фильтрата; 5) синтезированный гидрогель переводили в алкоголь путем замещения воды с использованием изопропилового спирта и углекислого калия; 6) полученный алкоголь погружали в автоклав высокого давления, заливали заданным объемом изопропилового спирта, герметизировали и нагревали до $240^\circ C$. Выдерживали материал при данной температуре и давлении 4.76 МПа в течение 6 часов.

Удельную поверхность и пористую структуру полученных графеновых аэрогелей исследовали с помощью изотерм сорбции-десорбции азота при 77 К на автоматическом приборе Autosorb-iQ (Quantachrome, США). Удельную поверхность рассчитывали методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Распределение пор по размерам (PSD) рассчитывалось с помощью теории функционала плотности (DFT).

Данные по адсорбции метана на данном адсорбенте получены для температур в интервале от 298.15 до 313.15 К и давлений до 100 бар. Перед любым экспериментом по адсорбции образцы дегазировали при $350^\circ C$ в течение 2 ч. Измерения сорбции метана под высоким давлением выполнялись анализатором адсорбции газа высокого давления и температуры iSorbHP производства Anton Paar GmbH с использованием метана высокой чистоты (99.999%).

Теоретическая часть

Экспериментальные данные изотерм адсорбции были обработаны с помощью модели Дубинина-Радушкевича. Достоверность данной модели оценивалась по коэффициенту регрессии R^2 , который варьируется от 0 до 1, и по нормированному стандартному отклонению Δa (%), определяемому как:

$$\Delta a = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(a_{\text{exp}} - a_{\text{mod}}) / a_{\text{exp}}]^2}{N - 1}} \quad (1)$$

где a_{exp} и a_{mod} – величины адсорбции газа, полученные из экспериментов и теоретических моделей соответственно, а N – количество точек данных изотермы адсорбции.

В общем виде термическое уравнение адсорбции ТОЗМ имеет вид [13]:

$$a = a_0 \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \quad (2)$$

где A – дифференциальная мольная работа адсорбции (Дж/моль); a_0 – предельная величина адсорбции при температуре N ; E – характеристическая энергия адсорбции исследуемого газа; n – целочисленная константа для адсорбционной системы.

Константа n , как отмечается в [13], зависит от типа адсорбента. Для углеродных микропористых адсорбентов $n=2$ (уравнение Дубинина-Радушкевича).

Предельные значения адсорбционной способности в микропорах a_0 для температур более высоких чем нормальные температуры кипения, плотности адсорбатов p^* и отвечающие им мольные объемы v^* вычисляются по уравнению [14]:

$$\lg p^* = \lg p_{\text{кн}} - 0.434a(T - T_{\text{кн}}) \quad (3)$$

где $p_{\text{кн}}$ – плотность нормальной жидкости при температуре кипения ($T_{\text{кн}}$); T – температура.

Тогда для области $T > T_{\text{кн}}$ получаем:

$$W_0 = \frac{a_0}{p_0} = a_0 v^* \quad (4)$$

На основании изложенного предельный объем адсорбционного пространства (удельный объем микропор) W_0 часто принимается в качестве одного из параметров термического уравнения адсорбции взамен a_0 :

$$a = a_0 \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] = \frac{W_0}{v^*} \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right] \quad (5)$$

Подставляя в данное уравнение адсорбции дифференциальную мольную работу ($A = RT \ln p_s / p$) получим термическое уравнение адсорбции, известное в литературе как уравнение Дубинина-Радушкевича:

$$a = \frac{W_0}{v^*} \exp \left[- B \frac{T^2}{\beta^2} (\lg p_s / p)^2 \right] \quad (6)$$

При расчете адсорбционных равновесий газов и паров на микропористых углеродных адсорбентах используют уравнение Дубинина-Радушкевича, в котором характеристическая энергия адсорбции E конкретного газа определяется через коэффициент аффинности $\beta = E / E_0$. Для расчета коэффициента аффинности обычно используют отношение паров исследуемого газа Π и стандартного пара Π_0 [13], т. е. $\beta = \Pi / \Pi_0$. В ТОЗМ на основе рентгеновских исследований микропористых углеродных адсорбентов принята связь между эффективной шириной микропор x_0 и стандартной характеристической энергией E_0 в виде $x_0 = 12 / E_0$ [15]. Параметр B отражает преобладающий размер микропор. Чем меньше микропоры в адсорбенте, тем меньше значение B и тем круче поднимаются изотермы адсорбции газов на данном адсорбенте. Параметр B непосредственно связан с характеристической энергией адсорбции E :

$$B = \left(\frac{2.303R}{E} \right)^2 \quad (7)$$

Отсюда

$$E = \left(\frac{2.303R}{\sqrt{B}} \right) \quad (8)$$

Для определения параметров B и W_0 по экспериментальной изотерме адсорбции, применяется его линейная форма:

$$\lg a = C - D(\lg p_s / p)^2 \quad (9)$$

C и D – коэффициенты, рассчитываются следующим образом:

$$C = \lg \frac{W_0}{v^*} \quad (10)$$

$$D = 0.434B \frac{T^2}{\beta^2} \quad (11)$$

Определив по пересечению и наклону линейной формы графика численные значения C и D , вычисляем B и W_0 .

Адсорбция всегда сопровождается выделением тепла. Теплота адсорбции определяется как $q = -\Delta H$ и, следовательно, является положительной величиной. Многие определения теплоты адсорбции можно найти в литературе [16], и среди них дифференциальная молярная теплота адсорбции (q), которая является ключевой термодинамической переменной для процессов адсорбции. Дифференциальная теплота адсорбции характеризует тепловой эффект в интервале изменения степени заполнения адсорбционного пространства и рассчитывается на основе

данных изотерм с использованием следующего уравнения [13]:

$$q = \lambda + E[(\ln a_0 / a)^{1/n} + (\alpha T / n)(\ln a_0 / a)^{(1/n)-1}] \quad (12)$$

где a_0 – предельная величина адсорбции при температуре T ; α – термический коэффициент предельной адсорбции; E – характеристическая энергия адсорбции исследуемого газа (метана); λ – теплота конденсации адсорбтива (метана); n – целочисленная константа для адсорбционной системы; a – количество адсорбированного вещества (метана); T – температура.

Обсуждение результатов

Характеристики поверхности и пористости аэрогелей. Текстуальные свойства разработанного материала были оценены с помощью измерений сорбции азота при 77 К. Полученные данные представлены в таблице 1.

Образец синтезированного графенового аэрогеля, использованный в данном исследовании, не является чисто микропористым адсорбентом (необходимого для адсорбции газов), но он имеет широкий диапазон размеров пор, сочетающий развитую микропористость с элементами мезопор. Анализ распределения пор по

Таблица 1. Структурные свойства графенового аэрогеля
 Table 1. Structural properties of graphene aerogel

Параметры	Значение
Удельная поверхность по азоту, рассчитанная по методу Брунауэра-Эммета-Теллера, $S_{БЭТ}$ [м ² /г]	657
Удельная поверхность по азоту, рассчитанная с помощью теории функционала плотности, S_{DFT} [м ² /г]	608
Удельный объем пор, рассчитанный с помощью теории функционала плотности, V_{DFT} [см ³ /г]	0.766
Удельный объем микропор, рассчитанный с помощью ТОЗМ, W_0 [см ³ /г]	0.149
Эффективная ширина пор по Дубинину, x_0 , [нм]	0.75
Удельный объем микропор, $V_{микро}$ [см ³ /г]	0.142
Удельный объем пор мезопор, $V_{мезо}$ [см ³ /г]	0.624
Удельный объем пор первой моды, V_{01} [см ³ /г]	0.142
Удельный объем пор второй моды, V_{02} [см ³ /г]	0.040
Удельный объем пор третьей моды, V_{03} , [см ³ /г]	0.586
Диаметр (ширина) пор первой моды, D_{01} , [нм]	0.8
Диаметр (ширина) пор второй моды, D_{02} , [нм]	4.5
Диаметр (ширина) пор третьей моды, D_{03} , [нм]	6.5
Насыпная плотность, d [г/см ³]	0.029

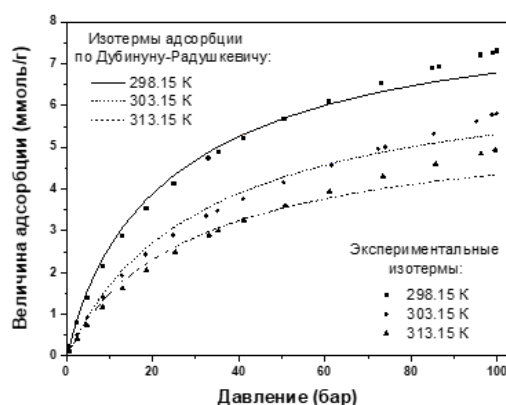


Рис 1. Изотермы адсорбции метана на графеновом аэрогеле при различных температурах, адаптированные по модели Дубинина-Радушкевича

Fig. 1. Isotherms of methane adsorption on graphene aerogel at different temperatures adapted from the Dubinin-Radushkevich model

размерам, рассчитанный с помощью теории функционала плотности (DFT), показал, что материал, имеет мультимодальное распределение пор по размеру, в частности преобладающий пик в центре около 0.8 нм, узкое распределение мезопор с максимумами около 4.5 нм и 6.5 нм (табл. 1). Кроме того, следует отметить, что значение удельного объема микропор, рассчитанное с помощью ТОЗМ соответствует значению рассчитанному с помощью теории функционала плотности и составляет 0.14 см³/г.

Изотермы адсорбции при разной температуре. Сорбционная емкость адсорбента является ключевым показателем, определяющим фактическую возможность использования данного материала в практических целях. На рис. 1 показано изменение адсорбционной способности в зависимости от равновесного давления. Было замечено, что все изотермы адсорбции метана при разных температурах показывают тип I [17], и степень адсорбции увеличивается с увеличением равновесного давления. Напротив, как и ожидалось, повышение температуры приводит к уменьшению количества адсорбированного метана, что соответствует экзотермическому процессу адсорбции. Маркерные точки на рис. 1 показывают экспериментальные данные, в то время как линии

используются для отображения результатов моделей изотермы, используемых в настоящем исследовании.

Как видно из рис. 1 адсорбция метана во всем интервале измеренных давлений растет вплоть до давлений 100 бар и достигает 7.31 ммоль/г при температуре 298 К. При всех исследованных давлениях адсорбция растет с понижением температуры.

Экспериментальные данные были обработаны с помощью модели Дубинина-Радушкевича (рис. 1). Коэффициент корреляции (R^2) и нормированное стандартное отклонение $\Delta a(\%)$ этих изотерм были рассчитаны и приведены в табл. 2.

Экспериментально полученные значения адсорбционной емкости для всех рассмотренных температур превышают предельные значения адсорбционной способности в микропорах a_0 , рассчитанные с помощью ТОЗМ в среднем около 20%, что является косвенным доказательством того, что метан адсорбируется в порах более 2 нм при соответствующем давлении.

Сообщалось, что энергетические значения ниже 8 кДж/моль означают, что процесс адсорбции можно рассматривать как физическую сорбцию [18]. Из таблицы 2 видно, что полученные значения для E оказались в диапазоне 5.47-5.64 кДж/моль и можно сказать, что процесс

Таблица 2. Коэффициенты изотермы адсорбции для модели Дубинина-Радушкевича
 Table 2. Adsorption isotherm coefficients for the Dubinin-Radushkevich model

Температура, К	Константы Дубинина-Радушкевича					
	$a_{экп}$, ммоль/г	$a_{мод}$, ммоль/г	a_0 , ммоль/г	E , кДж/моль	R^2	Δa (%)
298.15	7.31	6.78	6.13	5.47	0.99	6.73
303.15	5.81	5.31	4.26	5.61	0.99	5.94
313.15	4.93	4.34	3.93	5.64	0.99	9.97

адсорбции представляет собой физическую адсорбцию.

Анализ дифференциальной теплоты адсорбции. Зависимость дифференциальных мольных теплот адсорбции метана от величины адсорбции на графеновом аэрогеле при температурах 298.15, 303.15, 313.15 К представлена на рис. 2.

Как следует из рис. 2, в области начальных заполнений микропор до ~0.5 ммоль/г теплота адсорбции при всех рассматриваемых температурах быстро падает с 24 до 19 кДж/моль что, вероятно, определяется адсорбцией молекул метана на наиболее энергетически выгодных адсорбционных центрах по механизму частично локализованной адсорбции. Затем, с ростом адсорбции до ~6 ммоль/г (при 298.15 К) наблюдается плавное падение теплоты до ~9 кДж/моль для всех исследуемых температур, связанное с дальнейшим заполнением микропор адсорбента.

Такой ход кривых теплоты адсорбции, вероятно, является следствием особенностей пористой структуры адсорбента – мультимодальностью структуры. С молекулярной точки зрения само падение теплоты адсорбции при высоких заполнениях, по-видимому, связано с нарастанием энергии отталкивания между молекулами в адсорбате на малых расстояниях.

Кроме того, следует отметить, что все значения q для графенового аэрогеля ниже 8 кДж/моль, что доказывает, что процесс адсорбции метана на графеновом аэрогле является физадсорбционным.

Заключение

На углеродном адсорбенте на основе графенового аэрогеля с мультимодальным распределением пор исследована адсорбция метана при давлениях до 100 бар и температурах 298.15, 303.15, 313.15 К. Максимальная величина адсорбции метана достигает 7.31 ммоль/г при 298.15 К и 100 бар.

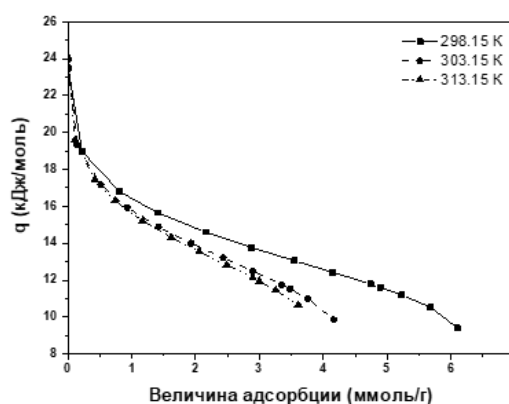


Рис. 2. Зависимость дифференциальной теплоты адсорбции метана от величины адсорбции на графеновом аэрогеле

Fig. 2. Dependence of the differential heat of methane adsorption on the graphene aerogel

Экспериментальные данные адсорбции метана на графеновом аэрогеле были проанализированы с использованием типовой модели адсорбции Дубинина-Радушкевича в интервале температур 298.15-313.15 К. Рассчитанные энергетические значения оказались в диапазоне 5.47-5.64 кДж/моль, что говорит о том, что процесс адсорбции метана на графеновом аэрогеле относится к физической адсорбции.

Рассчитана дифференциальная мольная теплота адсорбции метана на графеновом аэрогеле. В начальной области заполнения микропор дифференциальная мольная теплота адсорбции метана на графеновом аэрогеле составляет 24 кДж/моль и при всех температурах практически постоянна. Теплота адсорбции затем падает до ~9 кДж/моль при ~6 ммоль/г (298.15 К) и при адсорбции ~4 ммоль/г (303.15-313.15 К). Падение теплоты адсорбции при высоких заполнениях, по-видимому, связано с нарастанием энергии отталкивания между молекулами в адсорбате на малых расстояниях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список источников/ References

1. Liu C.M., Dang Y.Y., Zhou Y.P., Liu J. et al., *Adsorption*, 2012, Vol. 18, pp. 321-325. DOI: 10.1007/s10450-012-9403-5.
2. Gomes V.G., Hassan M.M., *Sep. Purif. Technol.*, 2001, Vol. 24, pp. 189-196. DOI: 10.1016/S1383-5866(00)00228-8.
3. Cavenati S., Grande C.A., Rodrigues A.E., *J. Chem. Eng. Data*, 2004, Vol. 49, pp. 1095-1101. DOI: 10.1021/je0498917.
4. Mofarahi M., Gholipour F., *Microporous Mesoporous Mater.*, 2014, Vol. 200, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.micromeso.2014.08.022.

5. Ursueguía D., Díaz E., Ordóñez S., *Microporous Mesoporous Mater.*, 2020, Vol. 298, 110048. DOI: 10.1016/j.micromeso.2020.110048.
6. Li S., Han K., Li J., Li M. et al., *Microporous Mesoporous Mater.*, 2017, Vol. 243, pp. 291-300. DOI: 10.1016/j.micromeso.2017.02.052.
7. Dong F., Lou H., Kodama A., Goto M. et al., *Sep. Purif. Technol.*, 1999, Vol. 16, pp. 159-166. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(98\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(98)00122-1).
8. Xia Y., Walker G.S., Grant D.M., Mokaya R., *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, Vol. 131, pp. 16493-16499. DOI: 10.1021/ja9054838.
9. Goj A., Sholl D.S., Akten E.D., Kohen D., *J. Phys. Chem. B*, 2002, Vol. 106, pp. 8367-8375. DOI: 10.1021/jp025895b.
10. Coasne B., Pellenq R.J.M., *J. Chem. Phys.*, 2004, Vol. 120, pp. 2913-2922. DOI: 10.1063/1.1632897
11. Lozano-Castello D., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A., Quinn D.F., *Carbon*, 2002, Vol. 40, pp. 989-1002. DOI: 10.1016/S0008-6223(01)00235-4.
12. Anas M., Unsal S., Erkey C., *J. Supercrit Fluids.*, 2018, Vol. 141, pp. 166-172. DOI: 10.1016/j.supflu.2017.11.032.
13. Dubinin M.M., *Adsorbtsiya i poristost'*, M., VAKHZ, 1972, 126 p.
14. Keltsev N.V., *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki. 2nd edition, revised and enlarged*, M., Nauka Publ., 1984, 592 p.
15. Dubinin M.M., *Adsorbtsiya v mikro-porakh. Pod red. Dubinina M.M., Serpinskogo V.V.*, M., Nauka Publ., 1983, 186 p.
16. Iruretagoyena Ferrer D. *Supported Layered Double Hydroxides as CO2 Adsorbents for Sorption-enhanced H2 Production*. Springer Theses, 2014, 209 p. DOI: 10.1007/978-3-319-41276-4_1.
17. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W. et al., *Pure Appl Chem.*, 1985, Vol. 57, pp. 603-619. DOI: 10.1351/pac198557040603.
18. Erdogan F.O., *Journal of Textiles and Engineer*, 2017, Vol. 24, pp. 181-187. doi:10.7216/1300759920172410706.



Информации об авторах / Information about the authors

А.Е. Меметова – к.т.н., доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

Е.А. Нескоромная – к.т.н., «Гиредмет», «Росатом», Москва

А.Д. Зеленин – ведущий инженер, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

А.В. Бабкин – к.т.н., ведущий научный сотрудник, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, «Гиредмет», Москва

Н.Р. Меметов – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Инжиниринг нанотехнологий», Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

А.В. Герасимова – ассистент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», Тамбовский государственный технический университет, Тамбов

A.E. Memetova – Ph.D., associate professor, Tambov State Technical University, Tambov, E-mail: anastasia.90k@mail.ru

E.A. Neskoromnaya – Ph.D., Giredmet; Rosatom, Moscow, E-mail: nenok.n1992@mail.ru

A.D. Zelenin – leading engineer, Tambov State Technical University, Tambov, E-mail: zeleandrey@yandex.ru

A.V. Babkin – Ph.D., leading researcher, Tambov State Technical University, Tambov, Giredmet, Moscow, E-mail: a.v.babkin93@yandex.ru

N.R. Memetov – Ph.D., associate professor, Tambov State Technical University, Tambov, E-mail: memetov.nr92@mail.tstu.ru

A.V. Gerasimova – assistant of the Department "Technique and technology for the production of nanoproducts", Tambov State Technical University, Tambov, E-mail: alyona_gerasimova_92@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.10.2021; одобрена после рецензирования 11.01.2022; принята к публикации 12.01.2022.

The article was submitted 27.10.2021; approved after reviewing 11.01.2021; accepted for publication 12.01.2022.