



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.12

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9330

### **Исследование адсорбции энантиомеров гистидина на углеродных нанотрубках в водном растворе на основе различных моделей адсорбции**

**Динь Туан Ле<sup>✉</sup>, Елена Васильевна Бутырская, Александр Анатольевич Волков, Андрей Сергеевич Гнеушев**

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, ledinh tuan@hpu2.edu.vn <sup>✉</sup>

**Аннотация.** Работа посвящена изучению адсорбции энантиомеров гистидина углеродными нанотрубками из водного раствора при 25°C. Для описания изотерм использованы модели Ленгмюра, БЭТ и кластерная модель адсорбции. В качестве аминокислот использованы энантиомеры гистидина производителя Sigma Aldrich, в качестве адсорбента – углеродные нанотрубки марки mkNANO MKN-SWCNT S1 (Канада). Построение изотерм осуществлено методом переменных концентраций. При этом использованы методы ультразвукового диспергирования, центрифугирования, спектрофотометрии. Изотермы имеют два плато и относятся к IV типу по классификации IUPAC. Модель Ленгмюра в области первого плато ( $0 \leq C_e \leq 0.018$  моль/дм<sup>3</sup>) и модель БЭТ для всей области концентраций  $0 \leq C_e \leq 0.04$  моль/дм<sup>3</sup>) лишь приблизительно согласуются с экспериментальной изотермой. Кластерная модель адсорбции обеспечивает очень хорошее согласование теории и эксперимента ( $R^2=0.996$  и  $R^2=0.999$ ). На основе модели кластерной адсорбции показано, что L- и D-гистидин сорбируются на поверхности нанотрубки в форме мономеров и кластеров размерности 13 (L-) и 9 (D-гистидин).

**Ключевые слова:** энантиомеры гистидина, углеродные нанотрубки, адсорбция.

**Для цитирования:** Ле Д.Т., Бутырская Е.В., Волков А.А., Гнеушев А.С. Исследование адсорбции энантиомеров гистидина на углеродных нанотрубках в водном растворе на основе различных моделей адсорбции // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 3. С. 235-242. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9330>

Original article

### **Study of adsorption of histidine enantiomers on carbon nanotubes in aqueous solution based on different adsorption models**

**Dinh Tuan Le<sup>✉</sup>, Elena V. Butyrskaya, Alexander A. Volkov, Andrey S. Gneushev**

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ledinh tuan@hpu2.edu.vn <sup>✉</sup>

**Abstract.** This study is devoted to the adsorption of histidine enantiomers by carbon nanotubes from aqueous solution at 25°C. The Langmuir, BET, and cluster adsorption models were used to describe the isotherms. Histidine enantiomers by Sigma Aldrich were used as amino acids, and the mkNANO MKN-SWCNT S1 carbon nanotubes (Canada) were used as adsorbents. The isotherms were built using the method of variable concentrations. We also used ultrasonic dispersion, centrifugation, and spectrophotometry. The isotherms have two plateaus and are of type IV according to the IUPAC classification. The Langmuir model in the region of the first plateau ( $0 \leq C_e \leq 0.018$  mol/dm<sup>3</sup>) and the BET model in the whole concentration region  $0 \leq C_e \leq 0.04$  mol/dm<sup>3</sup>) only approximately agree with the experimental isotherm. The cluster model of adsorption showed a very good agreement between the theory and the experiment ( $R^2=0.996$  and  $R^2=0.999$ ). Using the cluster adsorption model, we demonstrated that L- and D-histidine were adsorbed on the nanotube surface in the form of monomers and clusters of size 13 (L-histidine) and 9 (D-histidine).

**Keywords:** histidine enantiomers, carbon nanotubes, adsorption.

**For citation:** Le D.T., Butyrskaya E.V., Volkov A.A., Gneushev A.S. Study of adsorption of histidine enantiomers on carbon nanotubes in aqueous solution based on different adsorption models. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(3): 235-242. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9330>  
<https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9330>

## Введение

Углеродные нанотрубки (УНТ), обладающие уникальными физико-химическими свойствами, стали объектом исследований, привлекающим особое внимание многих ученых в последние годы прошлого века. Данные наноматериалы обладают большой механической прочностью, высокой химической инертностью, уникальными электронными и оптическими свойствами, значительной адсорбционной способностью и др. [1-3]. УНТ являются перспективными материалами для применения во многих областях жизни, таких как биомедицина, фармакология, тканевая инженерия. В биомедицине одним из основных направлений исследований является разработка платформы адресной доставки лекарств [4-6]. Химически инертные УНТ с высокой адсорбционной способностью являются потенциальным материалом, который может стать «носителем» для данной платформы. Для их направленного применения необходимо понимание механизма взаимодействия УНТ с биологическими молекулами. Важнейшими биологическими макромолекулами являются белки, образующимися за счет пептидных связей между молекулами аминокислот. Одной из основных незаменимых аминокислот является гистидин, который существует в виде двух оптических изомеров L и D. В данной работе рассмотрена равновесная адсорбция энантиомеров гистидина на углеродных нанотрубках в рамках моделей Ленгмюра, БЭТ и модели кластерной адсорбции [7-9].

## Экспериментальная часть

**Построение изотермы адсорбции.** Материалы: одностенные углеродные нанотрубки (сорбент) mkNANOMKN-

SWCNTS1 (Канада) с характеристиками: чистота 90%, длина: 0.5-2 нм, диаметр 1-2 мкм, представляющие собой смесь трубок различных хиральностей; аминокислоты L- и D- гистидин от производителя SigmaAldrich, чистота 99%.

Оборудование: ультразвуковая установка МФ91, шейкер-инкубатор ES-20, центрифуга CenturionScientific (C2 series), спектрофотометр Shimadzu-1800.

Готовили суспензию, содержащую воду, углеродные нанотрубки и энантиомеры гистидина различных концентраций. В условиях эксперимента значение pH раствора находилось в интервале от 7.5 до 8.5, соответствующем цвиттер-ионной форме аминокислоты. Полученные суспензии подвергались воздействию ультразвука в течение 3 минут, затем перемешивались 19 часов в шейкер-инкубаторе при 25°C до установления равновесия. Такой режим был выявлен ранее [8] кинетическими исследованиями. Затем суспензии центрифугировались 2 раза по 10 минут каждый. Концентрации аминокислоты в супернатанте были определены спектрофотометрически. Изотермы адсорбции проанализированы в рамках моделей Ленгмюра, БЭТ и модели кластерной адсорбции [9,10].

Модель кластерной адсорбции разработана в нашей работе [9] и описывает адсорбцию мономерных молекул сорбата А с формированием на поверхности сорбента S кластеров различных размерностей в соответствии с уравнениями:

$$\begin{cases} S + A = SA \\ S + 2A = SA_2 \\ \dots \\ S + nA = SA_n \end{cases} \quad (1)$$

Соответствующее уравнение изотермы имеет вид [9]:

$$q = q_m \frac{K_1 C_e + \frac{2}{m_2} K_2 C_e^2 + \dots + \frac{1}{m_1} K_1 C_e^1 + \dots + \frac{n}{m_n} K_n C_e^n}{1 + K_1 C_e + K_2 C_e^2 + \dots + K_1 C_e^1 + \dots + K_n C_e^n} \quad (2)$$

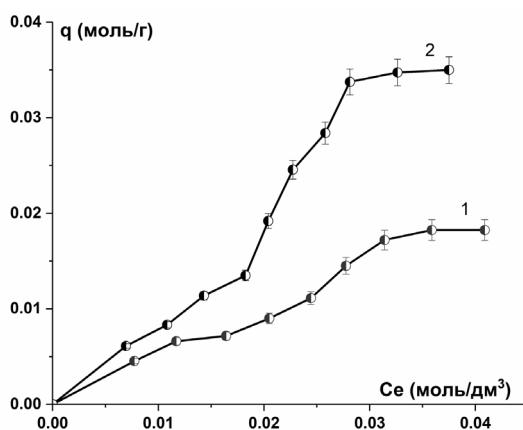


Рис.1. Изотермы адсорбции L- гистидина (1) и D-гистидина (2) на УНТ mkNANO-MKN-SWCNT-S1 в водных растворах

Fig. 1. Adsorption isotherms of L-histidine (1) and D-histidine (2) on the mkNANO-MKN-SWCNT-S1 CNT in aqueous solutions

где  $q$  – величина адсорбции,  $C_e$  – равновесная концентрация, моль/дм<sup>3</sup>;  $q_m$  – емкость монослоя, моль/г;  $K_i$  – коэффициенты равновесия процессов (1),  $i$  ( $n$ ) – текущая (максимальная) размерность сорбированных кластеров;  $m_i$  – число мономеров сорбата первого (нижнего) слоя кластера размерности  $i$ . Модель кластерной адсорбции способствует более глубокому пониманию механизма адсорбции. В ее уравнении содержатся константы, которые дают дополнительную информацию, описывающую процесс адсорбции. Модели Ленгмюра и БЭТ являются частными случаями уравнения (2): модель Ленгмюра получается из (2) при  $n=1$ ), модель БЭТ – при  $m_2 = m_3 = \dots = m_n = 1$  в совокупности с предположениями БЭТ.

### Обсуждение результатов

**Изотермы адсорбции.** На рис. 1 представлены изотермы адсорбции L- и D-гистидина на УНТ марки mkNANO-MKN-SWCNT-S1 из водного раствора [10]. Относительное стандартное отклонение в экспериментах составило 6%.

Из формы изотерм (рис. 1) следует, что они относятся к типу IV по классификации ИЮПАК. Первое плато на изотерме L-гистидина является четким, для D-гистидина первое плато выражено менее четко.

**Интерпретация изотерм адсорбции в рамках моделей Ленгмюра и БЭТ.** На первом этапе исследована возможность количественного описания равновесия для начального участка изотермы ( $0 \leq C_e \leq 0.018$  моль/дм<sup>3</sup>, область первого плато) в рамках модели Ленгмюра [7]. Затем исследована возможность описания адсорбции энантиомеров на УНТ для всей концентрационной области (рис. 1) в рамках модели полимолекулярной сорбции БЭТ [7,8]. Для определения значений констант, входящих в уравнения изотерм исследуемых моделей, использовали линеаризованные уравнения (табл. 1). Рассчитанные значения параметров представлены в таблице 2.

На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных изотерм, соответствующих первому плато (рис. 1), с изотермами, полученными в рамках модели Ленгмюра. На рис. 3 изображены экспериментальные изотермы для всей концентрационной области и изотермы, полученные в рамках модели БЭТ. Значение емкости монослоя, полученной в рамках модели Ленгмюра и БЭТ близки между собой.

Значения  $R^2$  всех четырех случаев свидетельствует лишь об очень приблизительном согласии теории Ленгмюра и БЭТ с экспериментальными изотермами.

Таблица 1. Модели Ленгмюра и БЭТ и их линейные формы.

Table 1. Langmuir and BET models and their linear forms.

Модель	Уравнение изотермы	Линейная форма
Ленгмюр	$q_e = \frac{C_e \cdot b \cdot q_m}{1 + C_e \cdot b}$	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b \cdot q_m} + \frac{C_e}{q_m}$
БЭТ	$q_e = \frac{q_m K_s C_e}{(1 - K_L C_e) \cdot (1 - K_L C_e + K_s C_e)}$	$\frac{C_e}{q_e \cdot (1 - K_L C_e)} = \frac{1}{q_m \cdot K_s} + \frac{C_e \cdot (K_s - K_L)}{q_m \cdot K_s}$

где  $q_e$  – величина адсорбции;  $C_e$  – равновесная концентрация внешнего раствора,  $q_m$  – максимальная адсорбционная способность монослоя, ммоль/г;  $b$  – коэффициент равновесия модели Ленгмюра;  $K_s$  – константа сорбционного равновесия адсорбент-адсорбат;  $K_L$  – константа сорбционного равновесия для полимолекулярного слоя.

Таблица 2. Величины сорбционных параметров для моделей Ленгмюра и БЭТ, рассчитанные из линеаризованных уравнений

Table 2. Sorption parameters for the Langmuir and BET models calculated from the linearised equations

Модель Ленгмюра				
Система	$q_m$ , ммоль/г	$b$ , $\text{дм}^3 \cdot \text{ммоль}^{-1}$	$R^2$	
Л-гистидин+УНТ	7.31	0.6354	0.911	
Д-гистидин+УНТ	14.20	0.2348	0.752	
Модель БЭТ				
Система	$q_m$ , ммоль/г	$K_L$ , $\text{дм}^3/\text{ммоль}$	$K_s$ , $\text{дм}^3/\text{ммоль}$	$R^2$
Л-гистидин + УНТ	7.3437	0.0162	0.2667	0.8981
Д-гистидин + УНТ	11.7694	0.0199	0.2265	0.7487

Этот вывод также следует из сопоставления экспериментальных и теоретических изотерм, представленных на рис. 2 и 3. Следовательно, даже в области первого плато (рис.2), адсорбция не является однослойной адсорбцией на однородной поверхности (приближение модели Ленгмюра). Согласно модели БЭТ структура сорбата на поверхности сорбента представляет собой совокупность многослойных кластеров с одной молекулой в каждом слое, что не характерно для реальных процессов адсорбции и обуславливает неудовлетворительное согласие теории и эксперимента.

Интерпретация изотерм в рамках кластерной модели адсорбции. Экспериментальные изотермы были также проинтерпретированы на основе кластерной модели адсорбции [9] (уравнение (2)). Значения параметров изотерм определены методом наименьших квадратов из условия наилучшего согласия теории и эксперимента. Такой подход приводит к

следующим уравнениям изотерм и величинам входящих в них параметров:

$$q = q_m \frac{K_1 C_e + \frac{13}{12} K_{13} C_e^{13}}{1 + K_1 C_e + K_{13} C_e^{13}} = q_1 + q_{13}, R^2=0.999,$$

Л-гистидин, (3)

$$q_m = 17 \text{ ммоль/г}; K_1 = 49.29(\text{моль/дм}^3)^{-1}; K_{13} = 5.03 \cdot 10^{20}(\text{моль/дм}^3)^{-13}.$$

$$q = q_m \frac{K_1 C_e + K_9 C_e^9}{1 + K_1 C_e + K_9 C_e^9} = q_1 + q_9, R^2=0.996,$$

Д-гистидин, (4)

$$q_m = 35.6 \text{ ммоль/г}; K_1 = 28.46 (\text{моль/дм}^3)^{-1}; K_9 = 8.62 \cdot 10^{14} (\text{моль/дм}^3)^{-9}.$$

Параметры, входящие в это уравнение расшифрованы в комментариях к уравнению (2). Емкость монослоя, полученная в рамках кластерной модели, существенно выше таковой, полученной в рамках моделей Ленгмюра и БЭТ, что объясняется ниже. Емкость монослоя для Д-гистидина больше, чем для Л-изомера. Это обу-

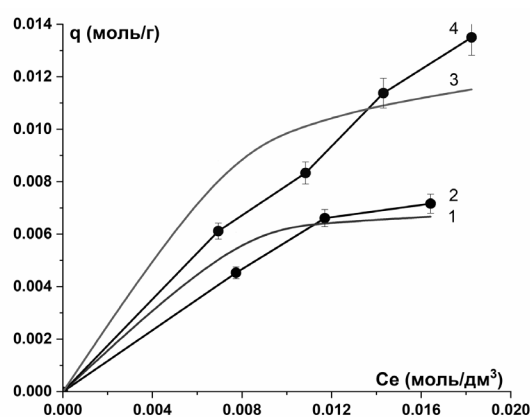


Рис. 2. Экспериментальные изотермы адсорбции энантиомеров гистидина (2 – L-гистидин, 4 – D-гистидин) на УНТ в области  $0 \leq C_e \leq 0.018$  моль/дм<sup>3</sup> и изотермы модели Ленгмюра: 1 – L-гистидин; 3 – D-гистидина).

Fig. 2. Experimental adsorption isotherms of histidine enantiomers (2 – L-histidine and 4 – D-histidine) on CNTs in the region of  $0 \leq C_e \leq 0.018$  mol/dm<sup>3</sup> and the Langmuir model isotherms (1 – L-histidine and 3 – D-histidine).

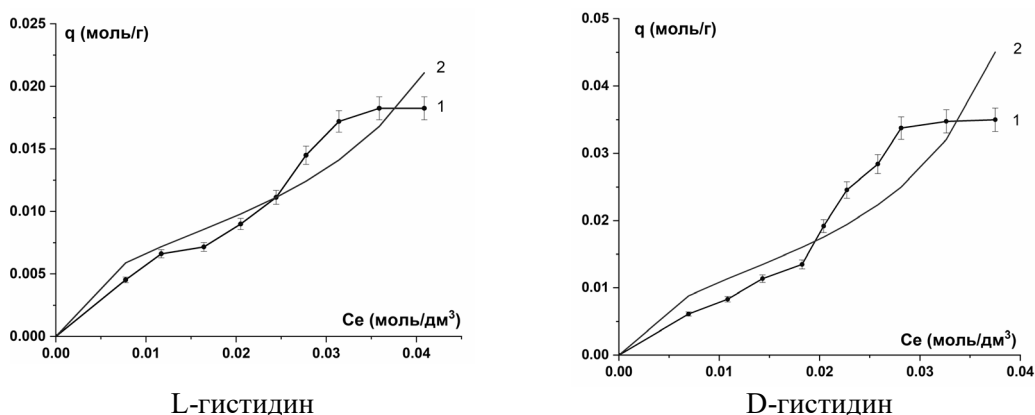


Рис. 3. Экспериментальные изотермы адсорбции энантиомеров гистидина на УНТ (1) (линии с точками) и изотермы адсорбции, полученные методом БЭТ (2) (линии без точек).

Fig. 3. Experimental adsorption isotherms of histidine enantiomers on CNTs (1) (dotted lines) and adsorption isotherms obtained by BET (2) (lines without dots).

словлено более высокой энергией адсорбции D-гистидина на УНТ, приводящей к более высокой диспергируемости нанотрубок в водной суспензии D-гистидина [10,11].

Поскольку степень, в которую возводится концентрация в уравнениях (2)-(4) означает размер сорбированных кластеров [9,10], можно сделать вывод, что L-гистидин сорбируется на поверхности УНТ в форме мономеров и кластеров из 13 молекул, а D-гистидин – в форме мономеров и кластеров из 9 молекул,  $q_1$ ,  $q_{13}$ ,  $q_9$  в правых частях уравнений (3) и (4) –

вклады в адсорбцию мономеров и соответствующих кластеров. В 13-частичных кластерах L-изомера в первом слое находится 12 молекул сорбата (знаменатель коэффициента перед  $C_e^{13}$  в (3)), кластер из 9 молекул D-гистидина полностью лежит в первом слое. Вследствие этого адсорбция, описываемая начальным участком изотермы (первое плато) не связана с емкостью монослоя.

Значения  $R^2$  указывают на существенно лучшее согласие кластерной модели адсорбции с экспериментом по сравнению с моделями Ленгмюра и БЭТ. Сравнение экспериментальных изотерм с

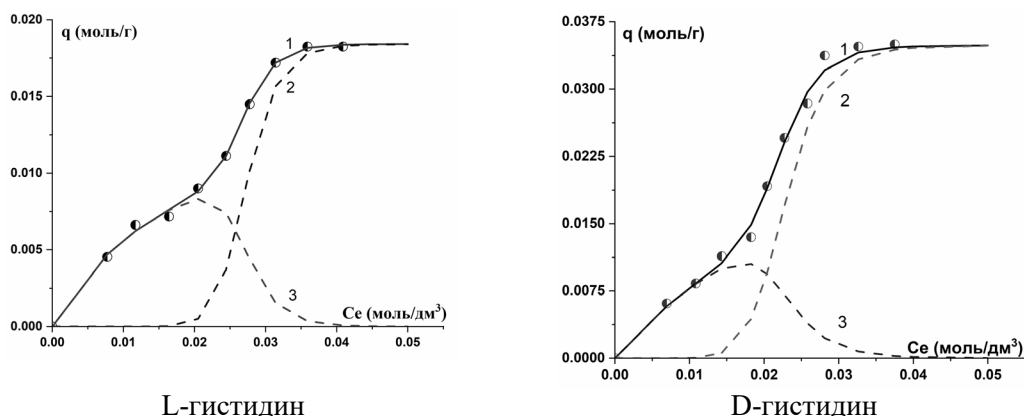


Рис.4. Экспериментальная (точки) и рассчитанные (1) (сплошные линии) изотермы адсорбции энантиомеров гистидина на УНТ; пунктир – вклады в адсорбцию кластеров (2) ( $q_{13}$  и  $q_9$ ) и мономеров (3) ( $q_1$ ).

Fig. 4. Experimental (dotted lines) and calculated (1) (solid lines) adsorption isotherms of histidine enantiomers on CNTs. The dashed line shows contributions to adsorption of clusters (2) ( $q_{13}$  and  $q_9$ ) and monomers (3) ( $q_1$ ).

изотермами, полученными в рамках кластерной модели, представлены на рис. 4. На данном рисунке также представлены парциальные вклады в адсорбцию  $q_1$ ,  $q_{13}$  и  $q_9$  как функция равновесной концентрации внешнего раствора.

Из рис. 4 следует, что при низкой концентрации внешнего раствора  $C_e$  преобладает адсорбция мономеров на поверхности УНТ. При высоких концентрациях преобладает адсорбция кластеров, что может быть проинтерпретировано следующим образом.

Углеродные нанотрубки имеют участки с различной сорбционной способностью. Так концы нанотрубок и их боковая поверхность имеют различную кривизну поверхности. Анализ литературы и результаты квантово-химических расчетов показывают, что энергия адсорбции органических соединений конечными участками нанотрубок и их дефектами существенно выше, чем энергия адсорбции боковой поверхностью [12-16]. Поэтому энантиомеры гистидина сначала фиксируются на конечных участках нанотрубок и их дефектах. Внутри УНТ молекулы сорбата не проникают, поскольку в эксперименте использованы трубки с закрытыми концами, а размеры

дефектов недостаточны для проникновения исследуемых аминокислот во внутреннюю часть УНТ [10]. Закрепление аминокислоты на боковой поверхности осуществляется посредством сил Ван-дер-Ваальса [10,17,18], в растворе аминокислоты удерживаются посредством водородных связей с молекулами воды. Последние разрываются при фиксации молекул сорбата на поверхности УНТ. Количественная оценка, проведенная в нашей работе [10,19] показывает, что адсорбция одиночных молекул сорбата боковой поверхностью УНТ энергетически менее выгодна, чем удерживание аминокислоты в растворе. Поэтому при низких концентрациях заполняются более реакционноспособные участки трубок (первое плато изотермы). С ростом концентрации на поверхности сорбента формируются кластеры сорбата, в том числе и в первом слое. В результате этого дополнительный вклад в энергию адсорбции вносят сорбат-сорбатные связи и адсорбция кластеров становится энергетически выгодной [9,10,20]. Это объясняет более высокое значение емкости монослоя, полученное в рамках кластерной модели по сравнению с результатами моделей Ленгмюра и БЭТ.



### Заключение

Изотермы адсорбции энантиомеров гистидина на углеродных нанотрубках mkNANO-MKN-SWCNTS1 из водного раствора проанализированы в рамках моделей Ленгмюра, БЭТ и модели кластерной адсорбции. Изотермы имеют два плато и относятся к IV типу по классификации ЮПАК. Модель Ленгмюра в области первого плато ( $0 \leq C_e \leq 0.018$  моль/дм<sup>3</sup>) и БЭТ для всей области концентраций  $0 \leq C_e \leq 0.04$  моль/дм<sup>3</sup>) лишь приближенно согласуются с экспериментальной изотермой. Кластерная модель адсорбции обеспечи-

вает очень хорошее согласование теории и эксперимента ( $R^2 = 0.996$  и  $R^2 = 0.999$ ). На основе модели кластерной адсорбции показано, что L- и D-гистидин сорбируются на поверхности нанотрубки в форме мономеров и кластеров размерности 13 (L-) и 9 (D-гистидин).

### 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 литературы/References

1. Rakov E.G. Carbon nanotubes in new materials. *Russ. Chem. Rev.* 2013; 82(1): 27-47. <https://doi.org/10.1070/RC2013v082n01ABEH004227>.
2. Dai H., Hafner J.H., Rinzler A.G. et al. Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy. *Nature.* 1996; 384: 147-150. <https://doi.org/10.1038/384147a0>.
3. Zhai P., Isaacs J.A., Eckelman M.J. Net energy benefits of carbon nanotube applications. *Appl. Energy.* 2016; 173: 624-634. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.001>.
4. Zhuang L., Chen K., Corrine D. et al. Drug Delivery with Carbon Nanotubes for In vivo Cancer Treatment. *Cancer. Res.* 2008; 68: 6652-6660. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-08-1468>.
5. Karimi M., Solati N., Ghasemi A. et al. Carbon nanotubes part II: a remarkable carrier for drug and gene delivery. *Expert Opinion on Drug Delivery.* 2015; 12(7): 1089-1105. <https://doi.org/10.1517/17425247.2015.1004309>.
6. Hossen S., Hossain M.K., Basher M.K. et al. Smart nanocarrier-based drug delivery systems for cancer therapy and toxicity studies: A review. *Journal of Advanced Research.* 2019; 15: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.06.005>.
7. Foo K.Y., Hameed B.H., Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal.* 2010; 156(1): 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.
8. Ebadi A., Soltan Mohammadzadeh J.S., Khudiev A. What is the correct form of BET isotherm for modeling liquid phase adsorption? *Adsorption.* 2009; 15(1): 65-73. <https://doi.org/10.1007/s10450-009-9151-3>.
9. Butyrskaya E.V., Zapryagaev S.A., Izmailova E.A. Cooperative model of the histidine and alanine adsorption on single-walled carbon nanotubes. *Carbon.* 2019; 143: 276-287. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.10.086>.
10. Le D.T., Butyrskaya E.V., Eliseeva T.V. Sorption Interaction between Carbon Nanotubes and Histidine Enantiomers in Aqueous Solutions. *Russ. J. Phys. Chem.* 2021; 95(11): 2280-2286. <https://doi.org/10.31857/S004445372111011X>.
11. Dalgliesh C. The synthesis of N'-formyl-DL-kynurenine, N<sup>α</sup>-acetyl-DL-kynurenine and related compounds, and observations on the synthesis of kynurenine. *J. Chem. Soc.* 1952; 29: 137-141. <https://doi.org/10.1039/jr9520000137>.
12. Badamshina E.R., Gafurova M.P., Estrin Y.I. Modification of carbon nanotubes and synthesis of polymeric composites involving the nanotubes. *Russ. Chem. Rev.*



2010; 79(11): 1027-1064. <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n11ABEH004114>.

13. Seongjun P., Deepak S., Kyeongjae C. Generalized Chemical Reactivity of Curved Surfaces: Carbon Nanotubes. *Nano Letters*. 2003; 3(9): 1273-1277. <https://doi.org/10.1021/nl0342747>.

14. Gulseren O., Yildirim T., Ciraci S. Tunable Adsorption on Carbon Nanotubes. *Phys. Rev. Letters*. 2001; 87(11): 1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.116802>.

15. Schaefer D.W., Justice R.S. How Nano Are Nanocomposites? *Macromolecules*. 2007; 40(24): 8501-8517. <https://doi.org/10.1021/ma070356w>.

16. Rakov E.G., Materials made of carbon nanotubes. The carbon nanotube forest. *Russ. Chem. Rev.* 2013; 82(6): 538-566. <https://doi.org/10.1070/RC2013v082n06ABEH004340>.

17. Berthod A. Chiral Recognition Mechanisms. *Anal. Chem.* 2006; 78(7): 2093-2099. <https://doi.org/10.1021/ac0693823>.

18. Butyrskaya E.V., Zapryagaev S.A., Izmailova E.A., Selemenev V.F. Mechanism of Sorption Interaction between L-Alanine and Carbon Nanotubes. *Russ. J. Phys. Chem.* 2019; 93(4): 710-716. <https://doi.org/10.1134/S0036024419040071>.

19. Butyrskaya E.V., Izmailova E.A., Le D.T. Understanding structure of alanine enantiomers on carbon nanotubes in aqueous solutions. *Journal of Molecular Structure*. 2022; 1259(132616): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132616>.

20. Butyrskaya E.V., Zapryagaev S.A., Cluster model of the step-shaped adsorption isotherm in metal-organic frameworks. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021; 322(111146): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111146>.

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Динь Туан Ле** – аспирант кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж;

**Е.В. Бутырская** – д.х.н., проф. каф. аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж;

**А.А. Волков** – студент кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж;

**А.С. Гнеушев** – студент кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж.

**Dinh Tuan Le** – the postgraduate student, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, e-mail: [ledinh tuan@hpu2.edu.vn](mailto:ledinh tuan@hpu2.edu.vn)

**E.V. Butyrskaya** – Ph.D. (Chem.), Prof. department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh. E-mail: [bev5105@yandex.ru](mailto:bev5105@yandex.ru)

**A.A. Volkov** – the student, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, e-mail: [aav11@ya.ru](mailto:aav11@ya.ru)

**A.S. Gneushev** – the student, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, e-mail: [andrey\\_gneushev@mail.ru](mailto:andrey_gneushev@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 11.03.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022; принята к публикации 17.06.2022.

The article was submitted 11.03.2022; approved after reviewing 23.05.2022; accepted for publication 17.06.2022.