

**УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА В АДСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ****И.И. Меньшова, Ю.М. Аверина, Е. Заболотная**

Ирина Игоревна Меньшова (ORCID 0000-0002-1072-127X)\*, Юлия Михайловна Аверина (ORCID 0000-0002-9475-2953), Елена Заболотная (ORCID 0000-0002-5461-5145)

Кафедра Логистики и экономической информатики, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская площадь, 9, Москва, Российская Федерация, 125047

E-mail: imenshova2022@gmail.com \*, averinajm@mail.ru, zabolotnaya.e@inbox.ru

*Исследованы параметры пористой структуры углеродных волокнистых сорбентов на основе полиакрилонитрильного волокна различной активации. Проанализированы волокнистые углеродные сорбенты для адсорбции водорастворимых органических соединений. Построены изотермы сорбции в координатах уравнения Ленгмюра исследуемых веществ на неактивированном и активированном углеродных волокнах, а также изотермы Брунауэра – Эммета – Теллера, которые позволяют достоверно рассчитать удельную поверхность углеродного волокнистого сорбента. Изотермы сорбции удовлетворительно описываются уравнением Фрейндлиха. Рассмотрена избирательность адсорбции с описанием изотерм адсорбции из растворов органических веществ. Отмечено, что линейная форма зависимости изотерм Дубинина-Радушкевича позволяет определить предельную величину адсорбции. Рассчитаны параметры систем «углеволоконистый сорбент-сорбат» по уравнениям Дубинина-Радушкевича и Брунауэра-Эммета-Теллера. Показано, что уравнения Дубинина-Радушкевича для анализа адсорбции в жидкой фазе позволяют описать более широкий интервал относительных концентраций, чем уравнения Ленгмюра, Френдлиха и Брунауэра – Эммета – Теллера. Показано, что для исследованных сорбентов изотермы адсорбции зависят от температуры, и характеристические кривые не являются инвариантными, что не лишает возможности применения уравнения Дубинина-Радушкевича для описания адсорбции в жидкой фазе для анализа экспериментальных данных изотерм адсорбции. Проанализированы значения сорбционной емкости извлечения органических веществ с использованием углеродного волокнистого сорбента. Показана эффективность применения в качестве сорбента органических соединений углеродного сорбента на основе полиакрилонитрильного волокна.*

**Ключевые слова:** адсорбция, углеродные волокна, сорбционная емкость, водорастворимые органические вещества, объем пор сорбента

**CARBON FIBERS IN THE ADSORPTION PROCESSES****I.I. Menshova, Yu.M. Averina, E. Zabolotnaya**

Irina I. Menshova \*, Yulia M. Averina, Elena Zabolotnaya

Department Logistics and Economic Informatics, Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia

E-mail: imenshova2022@gmail.com \*, averinajm@mail.ru, zabolotnaya.e@inbox.ru

*The parameters of the porous structure of carbon fiber sorbents based on polyacrylonitrile fiber of different activation have been studied. Fibrous carbon sorbents for the adsorption of water-soluble organic compounds have been analyzed. Sorption isotherms were constructed in the coordinates of the Langmuir equation of the studied substances on non-activated and activated carbon fibers, as well as Brunauer-Emmett-Teller isotherms, which allow one to reliably calculate the specific surface area of a carbon fiber sorbent. The sorption isotherms are satisfactorily described by the Freundlich equation. The selectivity of adsorption with a description of adsorption isotherms*

*from solutions of organic substances is considered. It is noted that the linear form of the dependence of the Dubinin-Radushkevich isotherms makes it possible to determine the limiting value of adsorption. The parameters of the «carbon-fiber sorbent-sorbate» systems were calculated using the Dubinin-Radushkevich and Brunauer-Emmett-Teller equations. It is shown that the Dubinin-Radushkevich equations for the analysis of adsorption in the liquid phase make it possible to describe a wider range of relative concentrations than the Langmuir, Freundlich and Brunauer-Emmett-Teller equations. It is shown that the adsorption isotherms for the studied sorbents depend on temperature, and the characteristic curves are not invariant, which does not make it impossible to use the Dubinin-Radushkevich equation to describe adsorption in the liquid phase for the analysis of experimental data on adsorption isotherms. The values of the sorption capacity for extracting organic substances using a carbon fiber sorbent are analyzed. The efficiency of using carbon sorbent based on polyacrylonitrile fiber as a sorbent of organic compounds is shown.*

**Key words:** adsorption, carbon fibers, sorption capacity, water-soluble organic substances, sorbent pore volume

**Для цитирования:**

Меньшова И.И., Аверина Ю.М., Заболотная Е. Углеродные волокна в адсорбционных процессах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 3. С. 52–58. DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6715.

**For citation:**

Menshova I.I., Averina Yu.M., Zabolotnaya E. Carbon fibers in the adsorption processes. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 3. P. 52–58. DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6715.

## ВВЕДЕНИЕ

Активированные углеродные сорбенты – эластичные материалы, являющиеся образованиями связанных микрокристаллов, образующих пористую структуру. На сегодняшний день это наилучший материал, используемый в технических целях, так как он отличается высокой эластичностью и механической вибро- и ударопрочностью, также он устойчив к воздействию разных сред за счет своей развитой пористой структуры. [1].

Разнообразие физико-механических и адсорбционных свойств эластичных адсорбентов обусловило их широкое применение. Эластичные сорбенты используются в воздухоочистительных фильтрах, в виде поглотителей в противогазах и респираторах; при очистки технических и питьевых вод, при извлечении драгоценных металлов из руд, находят применение в медицине [2-6].

С помощью карбонизации химических волокон, с дальнейшей их активацией, получают адсорбенты в виде лент, тканей, нитей, волокон, нетканых материалов. Разнообразие форм получаемых адсорбентов способствует гибкости аппаратного оформления сорбционных процессов. Избирательность адсорбции позволяет легко работать с водными растворами веществ, содержащих гидрофильные и гидрофобные группы.

Цель работы исследование свойств нового синтезируемого углеродного волокна в качестве сорбента сточных вод, содержащих растворимые и малорастворимые красители.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования пористой структуры углеродного активированного и не активированного волокна марки АУТ-М проводились на объемной высоковакуумной установке ASAP-2020 MP Micromeritics USA [7] в интервале относительных давлений  $10^{-6}$ -0,99 мм. рт. ст. при температуре -468,89 К. Установка оснащена программным обеспечением Microsoft Excel, Origin Pro, позволяющим провести расчет пористой структуры исследуемого волокна с использованием уравнений Ленгмюра, БЭТ, Дубинина – Стекли, Дубинина – Астахова [8, 9]. Проводилось определение общей удельной поверхности углеродного волокна методом БЭТ по методике, приведенной в [10, 11]. Определение объема микропор  $W_0$  и расчет характеристической энергии адсорбции  $E_0$  проводили с положениями теории объемного заполнения микропор (ТОЗМ). Использовали методику определения сорбционной емкости сорбента, а расчет полуширины микропор  $X_0$  проводили по обобщенному уравнению Стекли [12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Углеродные волокна получают карбонизацией и активацией полимерных волокон. В результате получают активный углеродный материал, состоящий из нитей толщиной 6-10 мкм, благодаря чему обеспечивается чрезвычайно развитая поверхность контакта сорбента с водой, а, следовательно, высокая скорость удаления примесей [13-15].

Углеродные волокна превосходят обычные активные угли по всем основным параметрам: сорбционной емкости, силе связывания сорбируемых молекул, скорости сорбции. Сравнительная характеристика углеродных волокон и активных углей представлена в табл. 1.

Активация водяным паром позволяет получать углеродные волокна с внутренней поверхно-

стью до 1500 м<sup>2</sup>/г. Благодаря такой огромной площади внутренней поверхности, активированные углеродные волокна являются прекрасными адсорбентами по сравнению с активированным углем. [14, 15]. В работе определяли параметры пористой структуры активированного и неактивированного образцов углеродного волокнистого сорбента марки АУТ-М, данные представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Свойства углеродных волокон (УВ) и активных углей**  
**Table 1. Properties of carbon fibers (CF) and active carbons [2, 3]**

Характеристики	Тип углеродного сорбента				
	УВ ПАН	УВ ГЦ	УВ ПЕК	УВ ФФС	Активные угли
Диаметр, мкм	6-11	7-18	11-17	9-10	1000-3000
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	700-1200	700-1550	700-2200	700-2500	500-950
Внешняя удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	1,0-1,5	1,0-2,0	0,5-1,0	0,2-0,7	0,01
Диаметр пор, нм	2-3	1-3	1-3	1-3	4-6
Адсорбция бензола, г/г	0,20-0,40	0,20-0,55	0,20-0,60	0,20-0,75	0,20-0,35
Содержание углерода, %	88-91	92-95	92-95	92-95	80-90

Таблица 2

**Параметры пористой структуры углеродного волокнистого сорбента марки АУТ – М**  
**Table 2. Parameters of the porous structure of the carbon fiber sorbent brand АУТ-М**

Волокно	S <sub>общ. удел. пов-ти</sub> , м <sup>2</sup> /г		S <sub>мезопор</sub> , м <sup>2</sup> /г	S <sub>микропор</sub> , м <sup>2</sup> /г	W <sub>0</sub> микропор, см <sup>3</sup> /г / X <sub>0</sub> микропор, нм	
	Уравнение БЭТ	Уравнение Ленгмюра	Уравнение Дубинина-Стекли	Уравнение Дубинина-Астахов		
Неактивированное	892,9	1103,3			111,1	1346,3
Активированное	1135,1	1404,6	185,8	1585,7	0,53	0,79

Таблица 3

**Значение сорбционной емкости углеродного волокнистого сорбента марки А-М**  
**Table 3. The value of the sorption capacity of carbon fiber sorbent brand А-М**

Название органического вещества	Молярная масса	Значения сорбционной емкости от изменения концентрации вещества	Масса навески адсорбента (M <sub>c</sub> ) = 50 мг; Объем исследуемого раствора (V) = 1000 мл. Исходная концентрация органического вещества мг/л: 2, 4, 6, 8, 10				
			2	4	6	8	10
Неактивированный углеродный волокнистый сорбент марки А-М							
3,7-бис(диметиламино)фенол-4-хлорид	319,86	Г <sub>i</sub> · 10 <sup>-4</sup> , мг/мг	84	100	108	114	110
пара-нитроанилин	138,12	Г <sub>i</sub> · 10 <sup>-4</sup> , мг/мг	75,6	88,6	103,2	109,2	123,4
1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамид	639,419	Г <sub>i</sub> · 10 <sup>-4</sup> , мг/мг	98,4	117,6	137,2	156,6	170,8
активированный углеродный волокнистый сорбент марки А-М							
3,7-бис(диметиламино)фенол-4-хлорид	319,86	Г <sub>i</sub> · 10 <sup>-4</sup> , мг/мг	88	100	116	124	128
пара-нитроанилин	138,12	Г <sub>i</sub> · 10 <sup>-4</sup> , мг/мг	79	93	107,5	114,9	137,8
1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамид	639,419	Г <sub>i</sub> · 10 <sup>-4</sup> , мг/мг	98,8	118,2	137,4	157	178,8

Анализируя полученные данные пористой структуры углеродного волокнистого сорбента марки АУТ-М, приведенные в табл. 2, можно сделать вывод об увеличении общего размера удельной поверхности сорбента после активации: при расчете по уравнению БЭТ  $S_{\text{общ}}$  возрастает с 892,9 м<sup>2</sup>/г до 1135,1 м<sup>2</sup>/г, а по уравнению Ленгмюра,  $S_{\text{общ}}$  возрастает с 1103,3 до 1404,6 м<sup>2</sup>/г. Размер микропор в ходе активации волокна увеличивается, так образец неактивированного волокна имеет полуширину микропор  $x_0 = 0,65$  нм, а активированного -  $x_0 = 0,79$  нм. Общая удельная поверхность мезопор  $S_{\text{ме}}$  также возрастает: для неактивированного образца она составляет 111,1 м<sup>2</sup>/г, активированного - 185,8 м<sup>2</sup>/г, что свидетельствует о невысоком количестве мезопор в структуре сорбента. Общая удельная поверхность микропор  $S_{\text{мр}}$ , определенная по уравнению Дубинина-Стекли, составляет 1346,3 и 1585,7 м<sup>2</sup>/г, соответственно, для неактивированного и активированного образцов. Таким образом, можно полагать, что сорбция на данных углеродных волокнах осуществляется как в микро-, так и в мезопорах [15-20].

Определение сорбционной активности сорбентов проводилось на модельных растворах 3,7-бис(диметиламино)фенотиазин-хлорида (метиленовый голубой), *пара*-нитроанилина (черный анилин), 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамида (дисперсный темно-синий 3).

Значения сорбционной емкости ( $\Gamma_i$ , мг/мг) неактивированного и активированного углеродного волокнистого сорбента марки А-М приведены в табл. 3.

Сорбционная емкость для каждого из веществ различна. Согласно данным, приведенным в табл. 3, углеродным волокнистым сорбентом наиболее хорошо адсорбируется 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамида, как в случае активации волокна, так и без нее, не смотря на самую высокую молекулярную массу из всех исследуемых веществ. Это, очевидно, объясняется его наихудшей растворимостью в воде, так как наилучшая сорбируемость из водных растворов наблюдается у гидрофобных веществ [21]. Кроме того, известно [22-24], что сорбируемость органических соединений возрастает с увеличением углеродной цепи и молекулярной массы.

Был проведен анализ влияния температуры на адсорбцию органических соединений неактивированным и активированным углеродным волокном, что позволяет изучить энергетические взаимодействия в данных системах. В качестве исследуемых систем использовали растворы 3,7 бис(диметиламино)фенотиазин-хлорида, *пара*-натроанилина и 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамида [25, 26].

На рис. 1 приведены равновесные изотермы адсорбции для 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамида при температурах 293, 313 и 343 К для неактивированного углеродного волокна.

На рис. 1 приведены равновесные изотермы адсорбции для 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамида при температурах 293, 313 и 343 К для неактивированного углеродного волокна.

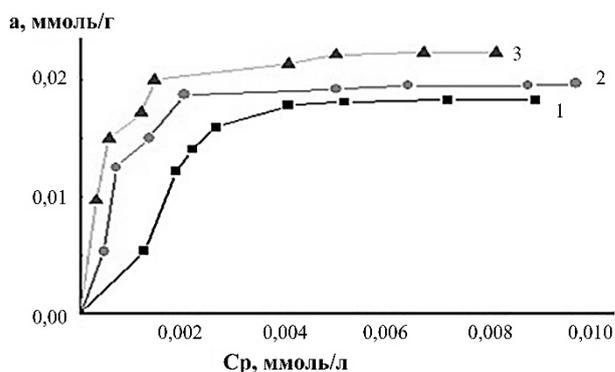


Рис. 1. Изотермы адсорбции растворов 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамида на АУТ – М, где  $a$  – равновесная величина адсорбции,  $C_p$  – концентрация адсорбата; 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 343 К

Fig. 1. Adsorption isotherms of solutions of 1-amino-9,10-dioxo-4-methylaminoanthracene-2-carboxamide on AUT – M, where  $a$  – equilibrium value of adsorption,  $C_p$  – concentration of the adsorbate; 1 – 293 K, 2 – 313 K, 3 – 343 K

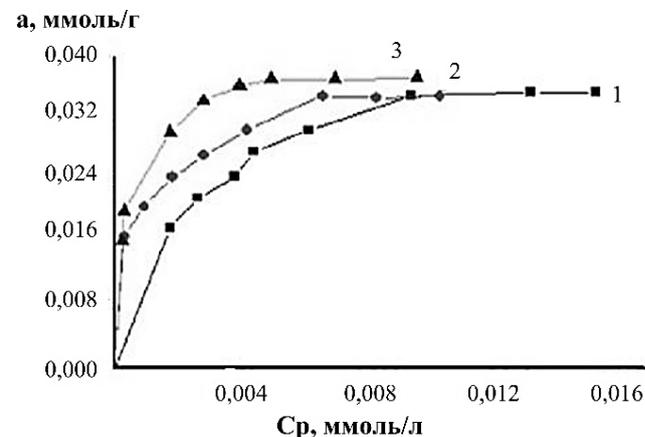


Рис. 2. Изотермы адсорбции растворов 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамида на активированном АУТ – М, где  $a$  – равновесная величина адсорбции,  $C_p$  – концентрация адсорбата; 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 343 К

Fig. 2. Adsorption isotherms of solutions of of 1-amino-9,10-dioxo-4-methylaminoanthracene-2-carboxamide on activated AUT-M, where  $a$  – equilibrium value of adsorption,  $C_p$  – concentration of the adsorbate; 1 – 293 K, 2 – 313 K, 3 – 343 K

Из полученных изотерм видно, что предельная величина адсорбции органических соединений после активации волокна возрастает [17].

Для анализа изотерм адсорбции широко используются уравнения Дубинина-Радужкевича и

Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Величина  $a_m$  (в ммоль/г) выражает емкость монослоя молекул адсорбата, покрывающего поверхность адсорбента, рассчитанная с использованием данных уравнений для исследованных выше систем, приведена в табл. 4.

Полученные результаты показали, что изотермы адсорбции зависят от температуры, и характеристические кривые не являются инвариантными. Невыполнение температурной инвариантности характеристических кривых не дает возможности применить аппарат ТОЗМ (теория объемного заполнения микропор) для пересчета изотерм на разные температуры. Однако это не лишает возможности применения уравнения Дубинина-Радушкевича для анализа экспериментально полученных изотерм адсорбции.

Если условие инвариантности выполняется, то можно пересчитывать изотермы адсорбции

в том интервале температур, где существует инвариантность. В противном случае, вполне достаточно описание изотерм в линейной форме уравнениями типа Дубинина-Радушкевича. Поэтому в каждом отдельном случае при изучении адсорбции из растворов необходима проверка наличия температурной инвариантности для определения возможности проведения расчетов [25, 26].

Отсутствие температурной инвариантности характеристических кривых для адсорбции исследованных веществ из водных растворов углеродным волокном марки АУТ-М, очевидно, связано с аномальной температурной зависимостью изотерм адсорбции 3,7 бис(диметиламино)фенотиазин хлорида и *para*-нитроанилина, которая обусловлена сочетанием различных факторов, связанных не только с пористой структурой, но и обусловленных химическим состоянием поверхности адсорбента.

Таблица 4

Параметры системы углеволокнистый сорбент - сорбат  
Table 4. Parameters of the system carbon fiber sorbent - sorbate

Наименование образца	Углеродное волокно марки АУТ-М			Активированное углеродное волокно марки АУТ-М		
	293 К	313 К	343 К	293 К	313 К	343 К
углеволокнистый сорбент – 3,7 бис(диметиламино)фенотиазин-хлорид						
Уравнение Брунауэра-Эммета-Теллера						
$a_m$ , ммоль/г	0,47	0,29	0,06	0,92	0,58	0,63
Уравнение Дубинина-Радушкевича						
$a_m$ , ммоль/г	1,89	0,53	0,08	3,30	8,27	7,73
углеволокнистый сорбент <i>para</i> -Нитроанилин						
Уравнение Брунауэра-Эммета-Теллера						
$a_m$ , ммоль/г	0,08	0,07	0,07	0,07	0,09	0,10
Уравнение Дубинина - Радушкевича						
$a_m$ , ммоль/г	9,03	8,99	8,99	0,09	0,11	0,12
углеволокнистый сорбент – 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамид						
Уравнение Брунауэра-Эммета-Теллера						
$a_m$ , ммоль/г	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04
Уравнение Дубинина-Радушкевича						
$a_m$ , ммоль/г	0,22	0,22	0,22	0,31	0,29	0,29

Таким образом, в ходе эксперимента были проведены исследования параметров адсорбции 3,7 бис(диметиламино)фенотиазин-хлорида, *para*-нитроанилина и 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамид активированным и неактивированным углеродным волокном марки АУТ-М из водного раствора при различных температурах. Для наиболее адекватного описания изотерм адсорбции из растворов провели измерения и сравнение изотерм адсорбции, полученных при различных температурах опыта, в модельной системе «углеволокнистый сорбент-сорбат». Были

рассчитаны значения предельных величин адсорбции 3,7 бис(диметиламино)фенотиазин-хлорида, *para*-нитроанилина и 1-амино-9,10-диоксо-4-метиламиноантрацен-2-карбоксамид по уравнениям Дубинина-Радушкевича и Брунауэра-Эммета-Теллера.

#### ВЫВОДЫ

Показано что, активация углеродного волокна АУТ-М острым паром приводит к изменению структуры углеродного волокна.

Рассчитаны параметры структуры исследуемых волокон. Показано, что активация приводит

к увеличению общей удельной поверхности сорбента, увеличивается размер и полуширина микропор, а также общая удельная поверхность мезопор.

Показано, что использование уравнения Дубинина-Радушкевича для анализа адсорбции в жидкой фазе позволяет описать более широкий интервал относительных концентраций, чем уравнения Ленгмюра, Френдлиха и БЭТ. Показана эффективность сорбции органических соединений углеродным сорбентом на основе полиакрилонитрильного волокна [27].

*Коллектив авторов выражает благодарность ЦКП им. Д.И. Менделеева.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The team of authors would like to thank the TsKP im. DI. Mendeleev.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## ЛИТЕРАТУРА

## REFERENCES

1. **Варшавский В.Я.** Углеродные волокна. М.: Мир. 2005. 500 с.
2. **Земскова Л.А.** Модифицированные углеродные волокна: сорбенты, электродные материалы, катализаторы. *Вестн. ДВО РАН*. 2009. № 2. С. 39-52.
3. **Лысенко А.А.** Перспективы развития исследований и производства углеродных волокнистых сорбентов. *Хим. волокна*. 2007. № 2. С. 4-11. DOI: 10.1007/s10692-007-0023-x.
4. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 27 августа 2009 года №1235-р. (дата обращения 15.06.2022).
5. Водный кодекс Российской Федерации: Закон РФ №74-ФЗ (с изменениями, внесенными ФЗ от 24.07.2009 года № 209). (дата обращения 15.06.2022).
6. **Postnov V.N., Rodinkov O.V., Moskvina L.N., Novikov A.G., Bugaichenko A.S., Krokhina O.A.** From carbon nanostructures to high-performance sorbents for chromatographic separation and concentration. *Russ. Chem. Rev.* 2016. V. 85. N 2. P. 115–138. DOI: 10.1070/RCR4551.
7. Фирма «MICROMERITICS», США, 4356 Communications Drive, Norcross, GA 30093, U.S.A.; <http://www.micromeritics.com>. (дата обращения 15.06.2022).
8. Microsoft Excel. <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/excel>.
9. Origin Pro. <https://www.originlab.com>.
10. **Misra D.N.** Adsorption on heterogeneous surface in Dubinin-Radushkevich equation. *Surf. Sci.* 1969. V. 18. N 2. P. 367-372. DOI: 10.1016/0039-6028(69)90179-4.
11. **Dubinin M.M., Plavnik G.M.** Carbon. *Chem. Soc. (London)*. 1968. V. 6. N 2. P. 183-192. DOI: 10.1016/0008-6223(68)90302-3.
12. **Гаврилова Н.Н., Назаров В.В.** Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2015. 132 с.
13. **Хтет Вин Аунг, Шешин Е.П., Вэй Зин Хланг.** Основные свойства углеродных волокон на основе полиакрилонитрила (ПАН). *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2019. Т. 1. С. 265-267.
14. **Горина В.А., Чеблакова Е.Г., Пешнева В.Б.** Влияние активации на удельную поверхность и пористую структуру углеродных волокон на основе вискозы и ПАН-волокна. *Вестн. МИТХТ*. 2013. Т. 8. № 6. С. 63-67.
15. **Tabarov F.S., Astakhov M.V., Kalashnik A.T., Klimont A.A., Krechetov I.S., Isaeva N.V.** Micro-mesoporous carbon materials prepared from the hogweed (*Heracleum*) stalks as electrode materials for supercapacitors. *Russ. J. Electrochem.* 2019. V. 55. N 4. P. 265–271. DOI: 10.1134/S1023193519020125.
1. **Varshavsky V.Ya.** Carbon fibres. M.: Mir. 2005. 500 p. (in Russian).
2. **Zemskova L.A., Sheveleva I.V.** Modified sorption-active carbon fiber materials. *Ros. Khim. Zhurn.* 2004. V. 48. N 5. P. 53-57 (in Russian).
3. **Lysenko A.A.** Prospects for the development of research and production of carbon fiber sorbents. *Khim. Volokna*. 2007. N 2. P. 4-11 (in Russian). DOI: 10.1007/s10692-007-0023-x.
4. Water strategy of the Russian Federation for the period up to 2020: approved. Decree of the Government of the Russian Federation dated August 27, 2009 N 1235-r. (accessed 15.06.2022) (in Russian).
5. Water Code of the Russian Federation: Law of the Russian Federation N 74-FZ (as amended by Federal Law No. 209 of July 24, 2009). (accessed 15.06.2022) (in Russian).
6. **Postnov V.N., Rodinkov O.V., Moskvina L.N., Novikov A.G., Bugaichenko A.S., Krokhina O.A.** From carbon nanostructures to high-performance sorbents for chromatographic separation and concentration. *Russ. Chem. Rev.* 2016. V. 85. N 2. P. 115–138. DOI: 10.1070/RCR4551.
7. MICROMERITICS, USA, 4356 Communications Drive, Norcross, GA 30093, U.S.A.; <http://www.micromeritics.com>. (accessed 15.06.2022).
8. Microsoft Excel. <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/excel>.
9. Origin Pro. <https://www.originlab.com>.
10. **Misra D.N.** Adsorption on heterogeneous surface in Dubinin-Radushkevich equation. *Surf. Sci.* 1969. V. 18. N 2. P. 367-372. DOI: 10.1016/0039-6028(69)90179-4.
11. **Dubinin M.M., Plavnik G.M.** Carbon. *Chem. Soc. (London)*. 1968. V. 6. N 2. P. 183-192. DOI: 10.1016/0008-6223(68)90302-3.
12. **Gavrilova N.N., Nazarov V.V.** Analysis of the porous structure based on adsorption data: textbook. Benefit. M.: RKhTU im. D.I. Mendeleev. 2015. 132 p. (in Russian).
13. **Htet Win Aung, Sheshin E.P., Wei Zin Hlaing.** Basic properties of carbon fibers based on polyacrylonitrile (PAN). *Elektronika Mikroelektronika SVCh*. 2019. V. 1. P. 265-267 (in Russian).
14. **Gorina V.A., Cheblakova E.G., Peshneva V.B.** Influence of activation on the specific surface area and porous structure of carbon fibers based on viscose and PAN fibers. *Vestn. MITKhT*. 2013. V. 8. N 6. С. 63-67 (in Russian).
15. **Tabarov F.S., Astakhov M.V., Kalashnik A.T., Klimont A.A., Krechetov I.S., Isaeva N.V.** Micro-mesoporous carbon materials prepared from the hogweed (*Heracleum*) stalks as electrode materials for supercapacitors. *Russ. J. Electrochem.* 2019. V. 55. N 4. P. 265–271. DOI: 10.1134/S1023193519020125.

16. **Комаров В.С.** Синтез и регулирование пористой структуры адсорбентов. Мн.: Бел. изд. Тов-во "Khata". 2003. 276 с.
17. **Balathanigaimani M.S., Shim W.G., Park K H., Lee J.W., Moon H.** Effects of structural and surface energetic heterogeneity properties of novel corn grain-based activated carbons on dye adsorption. *Microporous Mesoporous Mater.* 2009. V. 118. P. 232 – 238. DOI: 10.1016/j.micromeso.2008.08.028.
18. **Валинурова Э.Р., Шаймухаметова Г.Ф., Кожанова А.А., Фокина Е.О.** Модифицированные углеродные волокна. Использование их для извлечения металлов и органических примесей из водных сред. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 103-108. DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.9y.
19. **Фазылова Г.Ф., Валинурова Э.Р., Хамитов Э.М., Кудашева Ф.Х.** Сорбция производных анилина на углеродной ткани. *Журн. физ. химии.* 2015. Т. 89. № 6. С. 1020-1024. DOI: 10.7868/S0044453715060096.
20. **Фазылова Г.Ф., Валинурова Э.Р., Хатмуллина Р.М., Кудашева Ф.Х.** Сорбционные параметры производных фенолов на различных углеродных материалах. *Сорбцион. и хроматограф. проц.* 2013. № 5. С. 728-735.
21. **Ягодовский В.Д.** Адсорбция. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 216 с.
22. **Заболотная Е., Меньшова И.И.** Физико-химический метод извлечения органических соединений из сточных вод. *Усп. в химии и хим. технологии.* 2018. Т. 32. № 8. С. 6-7.
23. **Заболотная Е., Меньшова И.И.** Эффективность применения нового перспективного материала для очистки сточных вод на основе цеолита. *Нов. матер. и перспект. технологии.* 2019. Вып. 5. С. 333-335.
24. **Меньшова И.И., Заболотная Е., Челноков В.В., Гарабджиу А.В.** Адсорбция органических веществ с применением цеолитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 130-137. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6427.
25. **Tolmachev A.M.** Adsorption of gases, vapors and solutions. Description and a priori calculations of adsorption equilibria. *Protect. Metals Phys. Chem. Surf.* 2010. V.46. N 3. P. 291-308. DOI: 10.1134/S2070205110030020.
26. **Толмачев А.М.** Описание адсорбционных равновесий. *Сорбц. и хроматограф. проц.* 2010. Т. 9. Вып. 1. С. 5-32.
27. **Меньшова И.И., Заболотная Е.** Углеродный волокнистый сорбент в процессах очистки водорастворимых стоков. *Совр. пробл. экологии. Иннов. технол.* 2022. Т. 28. С. 11-15.
16. **Komarov V.S.** Synthesis and regulation of the porous structure of adsorbents. Mn.: Bel. ed. Tov-vo "Khata". 2003. 276 p. (in Russian).
17. **Balathanigaimani M.S., Shim W.G., Park K H., Lee J.W., Moon H.** Effects of structural and surface energetic heterogeneity properties of novel corn grain-based activated carbons on dye adsorption. *Microporous Mesoporous Mater.* 2009. V. 118. P. 232 – 238. DOI: 10.1016/j.micromeso.2008.08.028.
18. **Valinurova E.R., Shaymukhametova G.F., Kozhanova A.A., Fokina E.O.** Modified carbon fiber. using them to remove metal and organic impurities from aquatic environments. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2018. V. 61. N 11. P. 103-108 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20186111.9y.
19. **Fazylova G.F., Valinurova E.R., Khamitov E.M., Kudasheva F.Kh.** Sorption of aniline derivatives on carbon fabric. *Zhurn. Fizich. Khim.* 2015. V. 89. N 6. P. 1020-1024 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044453715060096.
20. **Fazylova G.F., Valinurova E.R., Khatmullina R.M., Kudasheva F.Kh.** Sorption parameters of phenol derivatives on various carbon materials. *Sorp. Khromat. Prots.* 2013. N 5. P. 728-735 (in Russian).
21. **Yagodovsky V.D.** Adsorption. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy. 2015. 216 p. (in Russian).
22. **Zabolotnaya E., Menshova I.I.** Physico-chemical method for extracting organic compounds from wastewater. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 32. N 8. P. 6-7 (in Russian).
23. **Zabolotnaya E., Menshova I.I.** The effectiveness of the use of a new promising material for wastewater treatment based on zeolite. *Nov. Mater. Perspektiv. Tekhnol.* 2019. V. 5. P. 333-335 (in Russian).
24. **Menshova I.I., Zabolotnaya E., Chelnokov V.V., Garabdzhiu A.V.** Adsorption of organic substances using zeolites. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 8. P. 131-138 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6427.
25. **Tolmachev A.M.** Adsorption of gases, vapors and solutions. Description and a priori calculations of adsorption equilibria. *Protect. Metals Phys. Chem. Surf.* 2010. V.46. N 3. P. 291-308. DOI: 10.1134/S2070205110030020.
26. **Tolmachev A.M.** Description of adsorption equilibrium. *Sorbts. Khromatograf. Prots.* 2009. V. 9. N 1. P. 5-32 (in Russian).
27. **Menshova I.I., Zabolotnaya E.** Carbon fiber sorbent in the treatment of water-soluble wastewater. *Sovr. Probl. Ekologii. Innov. Tekhnol.* 2022. V. 28. P. 11-15 (in Russian).

Поступила в редакцию 29.08.2022

Принята к опубликованию 12.12.2022

Received 29.08.2022

Accepted 12.12.2022