



УСТАНОВЛЕНИЕ АДСОРБЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ОБРАЗЦОВ УГЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ ПО ОТНОШЕНИИ К ИОНАМ Cu^{2+}

¹Очилов Г.М., ²Бахронов Х.Н.,

³Эргашев О.К., ⁴Холиков К.А.,

⁵Худойбердиев Н.Э. ⁶Абдумаликов А.А., ⁷Матмусаев А.К.

¹д.х.н., проф., Кокандского государственного педагогического института

²д.х.н., проф., Ташкентский университет информационных технологий имени
Мухаммада ал-Хоразмий

³д.х.н., проф., Наманганский инженерно-технологический институт

⁴соискатель, Наманганский инженерно-технологический институт

⁵соискатель, Наманганский инженерно-технологический институт

⁶соискатель Кокандского государственного педагогического института

⁷базовый докторант Кокандского государственного педагогического института

Аннотация В данной статье представлены результаты исследования адсорбционной активности углеродных сорбентов, полученных из полимерных отходов полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полиэтилена (ПЭ), в отношении ионов меди (Cu^{2+}). Особое внимание уделено влиянию модификации углей добавками окисленного графита (ОГ) и порофоров на их структурные и адсорбционные характеристики. Анализ изотерм адсорбции показал, что модификация существенно увеличивает сорбционную емкость материалов: максимальная адсорбция для ПЭТ-ОГ10+ПФ и ПЭ-ОГ10+ПФ составила 96,15 мг/г и 55,56 мг/г соответственно. Полученные данные подтвердили, что добавление ОГ и порофора способствует увеличению удельной поверхности, объема пор и числа активных центров, что улучшает эффективность адсорбции. Результаты исследования открывают перспективы для использования модифицированных углеродных сорбентов в системах очистки сточных вод и решении экологических проблем, связанных с утилизацией пластиковых отходов.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, полиэтилен, углеродные сорбенты, окисленный графит, порофор, адсорбция, ионы меди, очистка сточных вод.

Введение

Утилизация полимерных отходов, таких как полиэтилентерефталат (ПЭТ) и полиэтилен (ПЭ), представляет собой актуальную задачу в условиях роста производства пластмасс и их негативного воздействия на окружающую среду []. ПЭТ и ПЭ широко используются в упаковочной промышленности благодаря своим свойствам, таким как

прочность, легкость и химическая устойчивость. Однако их массовое применение приводит к образованию значительного объема отходов, которые плохо поддаются биоразложению и часто оказываются в окружающей среде, создавая экологические проблемы [1-4, 14, 15].

Одним из перспективных направлений переработки полимерных отходов является их преобразование в углеродные материалы, которые могут использоваться в качестве сорбентов для очистки сточных вод. Углеродные сорбенты, благодаря своей высокой удельной поверхности и развитой пористой структуре, демонстрируют эффективность в удалении различных загрязнителей, включая тяжелые металлы. Особую важность имеет разработка сорбентов для удаления ионов меди (Cu^{2+}), которые являются токсичными загрязнителями и часто присутствуют в промышленных сточных водах [5-9].

Исследование адсорбционных свойств углеродных материалов, полученных из ПЭТ и ПЭ, позволяет не только решить проблему утилизации пластиковых отходов, но и создать эффективные материалы для очистки воды. Особое внимание в данном исследовании уделяется влиянию модифицирующих добавок, таких как окисленный графит (ОГ) и порофоры, на структуру углей и их сорбционную емкость по отношению к ионам Cu^{2+} [10-13].

Целью работы является изучение адсорбционной активности углеродных материалов, полученных из полимерных отходов, и оценка влияния модификации на их структурные и функциональные свойства. Полученные результаты помогут в разработке новых эффективных технологий очистки воды и улучшении подходов к переработке пластиковых отходов.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были выбраны угли, полученные на основе отходов полиэтилентерефталата (ПЭТ-700) и полиэтиленовых крышек (ПЭ-700) термической обработкой при 700°C , а также те же угли, только с содержанием 10% окисленного графита (ПЭТ-ОГ10, ПЭ-ОГ10).

Для исследования адсорбции ионов Cu^{2+} углеродными адсорбентами использовали модельные растворы с концентрацией 1–100 мг/л, приготовленные разбавлением 1000 мг/л раствора $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Навеску адсорбента массой 0,05–0,5 г, предварительно высушенную при 105°C , добавляли в 50 мл раствора. Эксперименты проводили в стеклянных флаконах при перемешивании на шейкере (150 об/мин) при комнатной температуре. Для кинетических исследований время контакта составляло 1–6 часов, для равновесных измерений — до 24 часов.

Количество адсорбированного Cu^{2+} (a , мг/г) рассчитывали по формуле:

$$a = \frac{(C_0 - C_1) * V}{m},$$

где C_0 и C_1 исходная и равновесная концентрация Cu^{2+} , мг/л, а V – объем раствора (л), m – масса адсорбента (г).

Результаты и их обсуждение

Проблема утилизации полимерных отходов, таких как полиэтилентерефталат (ПЭТ) и полиэтилен (ПЭ), является одной из наиболее острых экологических задач современности. Преобразование таких отходов в углеродные материалы для очистки воды представляет собой перспективное направление, позволяющее одновременно снизить негативное воздействие пластика на окружающую среду и решить задачу удаления токсичных загрязнителей, таких как ионы Cu^{2+} , из сточных вод.

Полученные изотермы в ходе исследования адсорбционной активности по Cu^{2+} приведены на рис. 1.

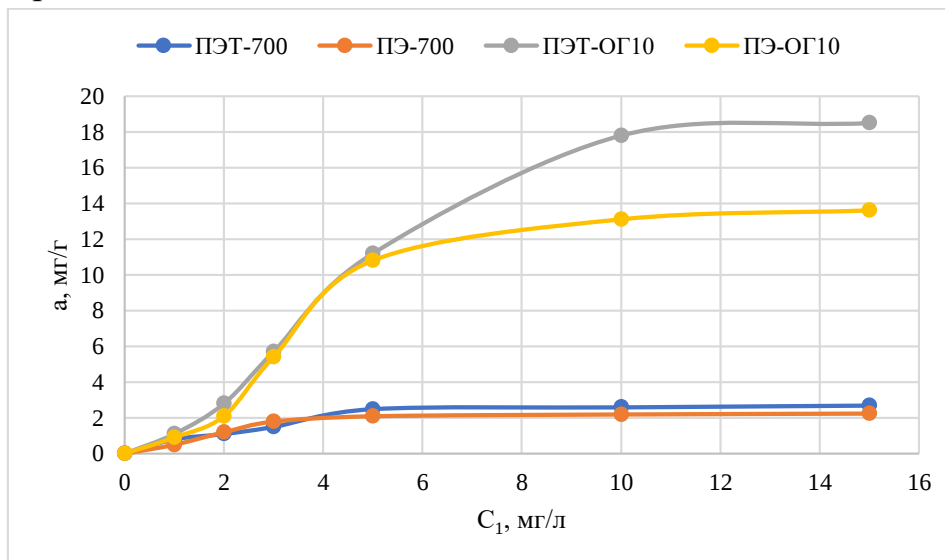


Рис. 1. Изотермы адсорбции Cu^{2+} на образцах углей.

На графике изотермы адсорбции ионов Cu^{2+} демонстрируют различия в адсорбционной способности углей из ПЭТ и ПЭ, а также с добавлением 10% ОГ.

Изотермы ПЭТ-700 и ПЭ-700, согласно классификации IUPAC, относятся к Типу I, характерному для микропористых материалов с ограниченным объемом пор. Низкая сорбционная емкость и линейный рост адсорбции на начальных стадиях указывают на физическую адсорбцию и малую удельную поверхность.

Изотермы ПЭТ-ОГ10 и ПЭ-ОГ10 показывают резкий рост адсорбции при низких концентрациях Cu^{2+} , за которым следует насыщение. Такая форма соответствует Типу II, типичному для материалов с развитой микропористой и мезопористой структурой. Резкий рост отражает наличие активных центров, а насыщение связано с заполнением пор.

Угли, полученные из ПЭТ и ПЭ при 700°C , показывают низкую адсорбционную способность к ионам Cu^{2+} : менее 2 мг/г для ПЭТ и менее 1,5 мг/г для ПЭ при C_e около 14 мг/л. Это связано с ограниченной пористой структурой и малым количеством функциональных групп для хемосорбции. Изотермы адсорбции отражают слабую пористость и ограниченное количество активных центров, характерных для углей без

добавок. Доминирующий механизм адсорбции — физическая, обусловленная ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями.

Добавление 10% окисленного графита (ОГ) существенно увеличивает адсорбционную способность углей. Максимальная адсорбция достигает 18 мг/г для ПЭТ-ОГ10 и 10 мг/г для ПЭ-ОГ10. Изотермы демонстрируют быстрый рост адсорбции при низких C_e , указывая на наличие активных центров, сформированных за счет увеличения пористости и введения кислородсодержащих функциональных групп (карбонильных, гидроксильных), усиливающих хемосорбцию.

Плато на изотермах при высоких C_e связано с насыщением адсорбционной емкости. Различия между ПЭТ-ОГ10 и ПЭ-ОГ10 объясняются более развитой структурой углей из ПЭТ. Таким образом, добавление ОГ значительно улучшает адсорбционные свойства углей, особенно для ПЭТ, благодаря увеличению удельной поверхности и количества активных центров.

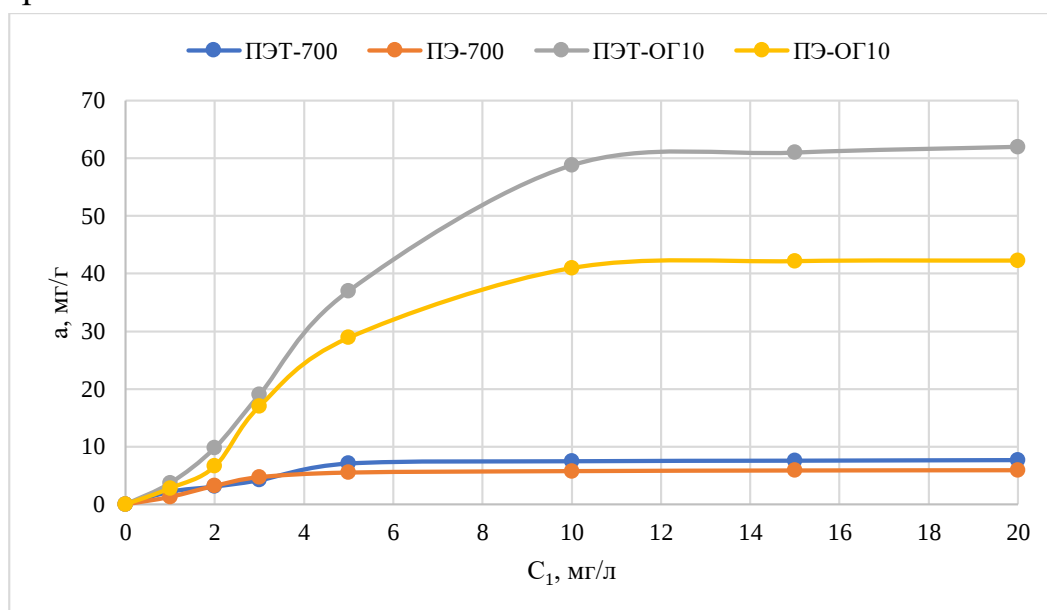


Рис. 2. Изотермы адсорбции Cu^{2+} на образцах углей, содержащих 2% порофора.

Добавление 2% порофора значительно улучшает адсорбционные свойства углей, особенно модифицированных окисленным графитом (ОГ), по сравнению с немодифицированными образцами. Для углей ПЭТ-ОГ10 и ПЭ-ОГ10 наблюдается резкий рост адсорбции Cu^{2+} на начальных стадиях, что связано с улучшением пористости и увеличением доступности активных центров. Максимальная сорбционная емкость достигает 62 мг/г для ПЭТ-ОГ10 и 42,3 мг/г для ПЭ-ОГ10. Более высокая емкость ПЭТ-ОГ10 обусловлена развитой микропористостью и высокой химической активностью кислородсодержащих функциональных групп, сформированных при модификации.

Немодифицированные угли ПЭТ-700 и ПЭ-700 демонстрируют линейные изотермы с низким ростом адсорбции, указывая на ограниченное количество активных центров и физический характер адсорбции. В отличие от них, угли с ОГ показывают ярко

выраженное насыщение изотерм, свидетельствующее о высокой специфической адсорбции и преобладании хемосорбции.

Таким образом, добавление порофора оказывает двойное действие: оно увеличивает удельную поверхность углей, улучшая доступность активных центров, и способствует образованию кислородсодержащих групп, усиливающих взаимодействие с ионами меди. Это подтверждает эффективность модификации углей для повышения их сорбционных характеристик.

Изотермы адсорбции были охарактеризованы с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха (табл. 1), что позволило оценить их применимость для описания адсорбции ионов Cu^{2+} на углях.

Таблица 1.

Параметры адсорбции ионов Cu^{2+} на образцах угля

Параметры уравнения Ленгмюра			
Образец	A_0	K_L	R^2
ПЭТ-700	3,38	0,304	97,0
ПЭ-700	2,50	0,684	98,3
ПЭТ-ОГ10	40,00	0,067	78,1
ПЭ-ОГ10	19,88	0,164	90,7
ПЭТ-700+ПФ	8,60	0,501	98,7
ПЭ-700+ПФ	6,14	1,364	99,9
ПЭТ-ОГ10+ПФ	96,15	0,109	90,0
ПЭ-ОГ10+ПФ	55,56	0,193	96,6
Параметры уравнения Фрейндлиха			
Образец	$1/n$	K_F	R^2
ПЭТ-700	0,564	0,8073	93,1
ПЭ-700	0,269	1,1847	73,5
ПЭТ-ОГ10	1,136	1,4863	95,5
ПЭ-ОГ10	1,586	0,8409	98,5
ПЭТ-700+ПФ	0,058	6,4954	96,4
ПЭ-700+ПФ	0,109	4,3719	81,9
ПЭТ-ОГ10+ПФ	1,063	4,7827	94,5
ПЭ-ОГ10+ПФ	1,221	3,2625	94,6

Модель Ленгмюра демонстрирует высокие значения коэффициента детерминации (R^2) для углей без ОГ, особенно для ПЭТ-700+ПФ ($R^2 = 98,7\%$) и ПЭ-700+ПФ ($R^2 = 99,9\%$), что указывает на адсорбцию на однородной поверхности с формированием мономолекулярного слоя. Модель Фрейндлиха, хотя и имеет несколько меньшие значения R^2 , лучше описывает угли с гетерогенной поверхностью, такие как ПЭТ-ОГ10

($R^2 = 95,5\%$) и ПЭ-ОГ10 ($R^2 = 98,5\%$), где возможна многослойная адсорбция на активных центрах с различной энергией.

Параметр A_0 (максимальная адсорбционная емкость) из модели Ленгмюра отражает количество активных центров на поверхности. Для углей без добавок (ПЭТ-700 и ПЭ-700) A_0 составляет 3,38 и 2,50 мг/г соответственно, что свидетельствует о низкой пористости. Угли с ОГ (ПЭТ-ОГ10 и ПЭ-ОГ10) демонстрируют значительно более высокие значения A_0 (40,00 и 19,88 мг/г), благодаря улучшенной пористости и функционализации поверхности. Максимальные значения A_0 наблюдаются для углей с добавлением порофора: 96,15 мг/г для ПЭТ-ОГ10+ПФ и 55,56 мг/г для ПЭ-ОГ10+ПФ, что связано с увеличением удельной поверхности и доступностью пор.

Параметр K_1 (энергия адсорбции) для ПЭТ-700 и ПЭ-700 составляет 0,304 и 0,684, что указывает на относительно слабую связь Cu^{2+} с поверхностью. Для углей с ОГ значения K_1 уменьшаются из-за увеличенной пористости, что снижает прочность взаимодействия ионов меди с функционализированной поверхностью. Таким образом, модификация углей с использованием ОГ и порофора значительно улучшает адсорбционные характеристики за счет увеличения пористости и числа активных центров.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить адсорбционную активность углеродных сорбентов, полученных из полимерных отходов, в отношении ионов Cu^{2+} . Результаты показали, что угли, полученные из полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полиэтилена (ПЭ), демонстрируют различия в адсорбционных свойствах, которые зависят от наличия модифицирующих добавок, таких как окисленный графит (ОГ) и порофоры.

Угли, полученные из чистых полимеров (ПЭТ-700 и ПЭ-700), характеризуются низкой сорбционной емкостью (до 2 мг/г), что связано с ограниченным объемом пор и малым числом активных центров. Модификация углей за счет добавления 10% ОГ значительно улучшает адсорбционные свойства, увеличивая максимальную сорбционную емкость до 40 мг/г для ПЭТ-ОГ10 и до 19,88 мг/г для ПЭ-ОГ10. Это связано с увеличением удельной поверхности, улучшением пористости и формированием кислородсодержащих функциональных групп, способных к хемосорбции.

Добавление порофора усиливает эффект модификации, увеличивая сорбционную емкость до 96,15 мг/г для ПЭТ-ОГ10+ПФ и 55,56 мг/г для ПЭ-ОГ10+ПФ. Результаты изотерм адсорбции, охарактеризованных с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха, подтвердили, что адсорбция на углях с добавками соответствует смешанному механизму, включающему как физическую адсорбцию, так и хемосорбцию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rhodes CJ. Plastic pollution and potential solutions. *Sci Prog.* 2018 Sep 1;101(3):207-260. doi: 10.3184/003685018X15294876706211. Epub 2018 Jul 19. PMID: 30025551; PMCID: PMC10365157.
2. Hammer J, Kraak MH, Parsons JR. Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift. *Rev Environ Contam Toxicol.* 2012;220:1-44. doi: 10.1007/978-1-4614-3414-6_1. PMID: 22610295.
3. Afshar S.V., Boldrin A., Astrup T.F., Daugaard A.E., Hartmann N.B. Degradation of biodegradable plastics in waste management systems and the open environment: A critical review // *Journal of Cleaner Production.* 2024. Vol. 434. P. 140000. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140000>.
4. Dey S., Veerendra G.T.N., Anjaneya Babu P.S.S., Phani Manoj A.V., Nagarjuna K. Degradation of plastics waste and its effects on biological ecosystems: A scientific analysis and comprehensive review // *Biomedical Materials & Devices.* DOI: <https://doi.org/10.1007/s44174-023-00085-w>.
5. Alaghemandi M. Sustainable Solutions Through Innovative Plastic Waste Recycling Technologies. *Sustainability.* 2024; 16(23):10401. <https://doi.org/10.3390/su162310401>
6. Tumu K., Vorst K., Curtzwiler G. Global plastic waste recycling and extended producer responsibility laws // *Journal of Environmental Management.* 2023. Vol. 348. P. 119242. ISSN 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119242>.
7. Tsuchimoto I., Kajikawa Y. Recycling of Plastic Waste: A Systematic Review Using Bibliometric Analysis // *Sustainability.* 2022. Vol. 14. P. 16340. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142416340>.
8. Dokl M., Copot A., Krajnc D., Fan Y.V., Vujanović A., Aviso K.B., Tan R.R., Kravanja Z., Čuček L. Global projections of plastic use, end-of-life fate and potential changes in consumption, reduction, recycling and replacement with bioplastics to 2050 // *Sustainable Production and Consumption.* 2024. Vol. 51. P. 498–518. ISSN 2352-5509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.025>.
9. Chen S., Liu Z., Jiang S., Hou H. Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes // *Science of The Total Environment.* 2020. Vol. 710. P. 136250. ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136250>.
10. Dimitrov N., Kratofil Krehula L., Ptiček Siročić A., Hrnjak-Murčić Z. Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography // *Polymer Degradation and Stability.* 2013. Vol. 98. Issue 5. P. 972–979. ISSN 0141-3910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.02.013>.
11. Zheng G., Wu J., Wang W., Pan C. Characterizations of expanded graphite/polymer composites prepared by in situ polymerization // *Carbon.* 2004. Vol. 42. Issue 14. P. 2839–2847. ISSN 0008-6223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.06.029>.

12. Xu X. Bin et al. The role of the surface microstructure of the microfibrils in an electrically conductive microfibrillar carbon black/poly(ethylene terephthalate)/polyethylene composite // Carbon N. Y. 2005. Vol. 43, № 7. P. 1479–1487.

13. Байбурдов Т.А., Шиповская А.Б. Полимерные сорбенты для сбора нефтепродуктов с поверхности водоёмов: обзор русскоязычной литературы за 2000–2017 гг. (часть 3) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18, вып. 3. DOI: 10.18500/1816-9775-2018-18-3-285-298

14. Seitnazarova O., Kalbaev A., Mamataliev N., Abdikamalova A., Najimova N. Structural features of montmorillonite-surfactant systems: Influence of surfactant packing density and montmorillonite surface nature // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2025. Vol. 60. No. 1. DOI: 10.59957/jctm.v60.i1.2025.5.

15. Mamataliev N., Abdikamalova A., Eshmetov I., Kalbaev A. Adsorption activity of pillared clays with respect to vapors of organic adsorbates // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2023. Vol. 58. No. 6. DOI: <https://doi.org/10.59957/jctm.v58i6.140>.