Статья поступила в редакцию: 06.10.2026
Статья принята к публикации: 14.10.2026
Статья опубликована: 07.11.2026

УДК 544.77+678.7

DOI: 10.32743/UniChem.2026.149.11.23549

Текстурные характеристики углеродных материалов, полученных из отходов полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полиэтилена (ПЭ), при модификации окисленным графитом и порофором

Холиков Камолиддин Абдуганиевич
ст. преп
д-р философии (PhD) в области техн. наук, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: xoliqov260887@gmail.com

Асфандияров Маруфжон Мансур угли
ст. преп
д-р философии (PhD) в области техн. наук, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: m.asfandiyorov@tuit.uz

Аманов Баходир Шарифович
ст. преп
Термезский государственный университет инженерии и агротехнологий
Республика Узбекистан, г. Термез
E-mail: bakhodiramanov02@gmail.com

Textural characteristics of carbon materials derived from polyethylene terephthalate (PET) and polyethylene (PE) waste modified with oxidized graphite and a pore-forming agent

Kholikov Kamoliddin Abduganievich
senior Lecturer
doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent

Asfandiyarov Marufjon Mansur ugli
senior Lecturer
doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi
Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Холиков К.А., Асфандияров М.М.У., Аманов Б.Ш. Текстурные характеристики углеродных материалов, полученных из отходов полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полиэтилена (ПЭ), при модификации окисленным графитом и порофором // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 11(149). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23549

Amanov Baxodir Sharifovich
senior Lecturer
Termez State University of Engineering and Agrotechnologies
Republic of Uzbekistan, Termez

Аннотация

Исследованы текстурные характеристики углеродных материалов, полученных из отходов полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полиэтилена (ПЭ) и модифицированных окисленным графитом (ОГ) и порофором (ПФ). Методом адсорбции–десорбции азота проанализированы изотермы, петли гистерезиса, удельная поверхность (S) и объёмы пор. Изотермы всех образцов отнесены к типу IV с гистерезисом, что указывает на мезопористую структуру. Базовые образцы ПЭТ-700 и ПЭ-700, полученные при 700 °C, имеют S = 50,04 и 85,59 м²/г. Введение 10 % ОГ повышает значения до 318,76 и 420,47 м²/г, а совместная модификация ОГ и ПФ до 825,99 и 1011,78 м²/г, то есть в 16,5 и 11,8 раза относительно базовых образцов. Объём пор Va достигает 1,006 см³/г, Vb — 0,774 см³/г для образца ПЭ-ОГ10+ПФ. Рост поверхности сопровождается развитием как микро-, так и мезопор, что свидетельствует о формировании иерархической пористой структуры. Полученные результаты сопоставлены с современными данными по активированным углям из пластиковых отходов, применяемым для очистки воды, улавливания CO_2 и в электрохимических системах. Показано, что материал ПЭ-ОГ10+ПФ является перспективным объектом для дальнейших сорбционных испытаний, регенерации и технико-экономической оценки. Совокупность данных подтверждает, что сочетание структурообразующего наполнителя и порообразователя позволяет целенаправленно регулировать текстуру углеродного материала из полимерных отходов.

Abstract

The textural characteristics of carbon materials derived from polyethylene terephthalate (PET) and polyethylene (PE) wastes and modified with oxidized graphite (OG) and a pore-forming agent (PF) were studied. Nitrogen adsorption–desorption isotherms, hysteresis loops, specific surface area (S) and pore volumes were analyzed. The isotherms of all samples were classified as type IV with hysteresis, indicating a mesoporous structure. The base PET-700 and PE-700 samples, prepared at 700 °C, have S values of 50.04 and 85.59 m²/g. The addition of 10 % OG increases these values to 318.76 and 420.47 m²/g, while the combined OG and PF modification raises them to 825.99 and 1011.78 m²/g, i.e. 16.5 and 11.8 times higher than the base samples. The pore volumes Va and Vb reach 1.006 and 0.774 cm³/g for the PE-OG10+PF sample. The growth of the surface area is accompanied by the development of both micropores and mesopores, which indicates the formation of a hierarchical porous structure. The results are compared with current data on plastic-waste-derived activated carbons used for water treatment, CO_2 capture and electrochemical systems. The PE-OG10+PF material is a promising object for further sorption tests, regeneration studies and techno-economic assessment. Taken together, the data confirm that combining a structure-forming filler with a pore-forming agent makes it possible to tune the texture of carbon materials obtained from polymer waste.

Ключевые слова: полимерные отходы, ПЭТ и полиэтилен, пористый углерод, удельная поверхность, адсорбция азота, окисленный графит, порофор.

Keywords: plastic waste, PET and polyethylene, porous carbon, specific surface area, nitrogen adsorption, oxidized graphite, pore-forming agent.

Введение

Рост объёмов полимерных отходов формирует необходимость перехода от простого удаления пластика к технологиям его ресурсной переработки. Особый интерес представляют процессы, при которых отходы превращаются в функциональные материалы с более высокой добавленной стоимостью. Пористые углероды являются одним из наиболее перспективных продуктов такой переработки благодаря развитой поверхности, возможности регулирования поровой структуры и широкому спектру применения в адсорбции, катализе и электрохимии.

ПЭТ и ПЭ различаются химическим строением и механизмами термодеструкции. ПЭТ содержит ароматические и сложноэфирные фрагменты, тогда как ПЭ имеет преимущественно алифатическую углеродную цепь. Эти особенности влияют на выход углеродного остатка, образование летучих продуктов и формирование пор. В ранее выполненной работе по термической обработке ПЭТ и ПЭ установлено, что диапазон 600-700 °C является рабочей областью формирования существенного углеродного остатка в инертной атмосфере [1, с. 74-77].

Современный обзор 2024 года показывает, что удельная поверхность углеродных материалов из пластиковых отходов может изменяться в широком диапазоне от 0,1 до 2152 м²/г, причём KOH является одним из наиболее распространённых активирующих агентов [2, с. 105386]. Это подтверждает, что конечная текстура определяется не только природой полимера, но и режимом карбонизации, активации и составом модифицирующих компонентов.

В 2025 году для активированного углерода из ПЭТ-отходов сообщалась удельная поверхность до 1313 м²/г; материал исследовался в системе получения пресной воды из атмосферной влаги с солнечной регенерацией [3, С. 107524]. В 2024 году активированный углерод из ПЭТ-отходов (использованных защитных щитков) был применён в качестве электродного материала гибких суперконденсаторов; удельная поверхность составила 1571 м²/г, объём пор 1,64 см³/г [4, С. 12781-12795]. Эти результаты показывают, что переработка пластика в пористые углероды развивается от лабораторной характеристики к прикладным системам.

Цель работы систематизировать и научно интерпретировать текстурные характеристики углеродных материалов из ПЭТ и ПЭ при последовательном введении ОГ и ПФ, а также сопоставить полученные результаты с современным уровнем исследований.

Задачи: анализ изотерм; оценка влияния ОГ; определение вклада ПФ; сравнение ПЭТ и ПЭ; анализ микропористости и мезопористости; обсуждение перспектив применения и направлений дальнейшей оптимизации.

Материалы и методы

Исследовались восемь составов: ПЭТ-700, ПЭ-700, ПЭТ-ОГ10, ПЭ-ОГ10, ПЭТ-700+ПФ, ПЭ-700+ПФ, ПЭТ-ОГ10+ПФ и ПЭ-ОГ10+ПФ. Обозначение «700» соответствует температуре термообработки 700 °C. ОГ10 обозначает введение 10 % окисленного графита. ПФ обозначает порофор, использованный для дополнительного развития поровой структуры.

Термообработку проводили в инертной атмосфере с контролем температуры термопарой; реактор включал подачу аргона, электронагреватель, реакционную сетку и отвод летучих продуктов [1, С. 74-77]. Такой режим уменьшает вероятность окисления углеродного остатка и позволяет управлять процессом карбонизации.

Текстурные характеристики определяли по данным адсорбции–десорбции азота. Использованы удельная поверхность S, объём микропор по t-Plot, а также показатели объёма пор Va и Vb. Форму изотерм и петли гистерезиса использовали для качественной оценки пористой структуры. IUPAC рассматривает газовую адсорбцию как базовый метод характеристики пористых твёрдых материалов, однако подчёркивает необходимость осторожной интерпретации BET-площади для микропористых систем [6, С. 1051-1069].

Графики Темкина применяли для дополнительной оценки энергетической неоднородности поверхности. Линейный участок рассматривается как область соответствия экспериментальных данных модели. При этом модель Темкина является дополнительным инструментом и не должна использоваться как единственное доказательство механизма физической или химической адсорбции.

Подробные условия дегазации образцов, диапазон линейности BET, точный состав порофора и параметры прибора в настоящей статье не приводятся и не реконструируются. Численные значения, представленные в таблице 1 и далее по тексту, соответствуют ранее полученным экспериментальным данным [5, С. e2438].

Результаты и обсуждение

Изотермы адсорбции–десорбции азота всех исследованных образцов относятся к типу IV с гистерезисом. IUPAC связывает изотермы типа IV с мезопористыми адсорбентами и капиллярной конденсацией; петля H3 характерна для агрегатов пластинчатых частиц и щелевидных пор [6, С. 1051-1069].

Изотермы исходных образцов ПЭТ-700 и ПЭ-700 характеризуются сравнительно небольшим количеством адсорбированного азота, что соответствует менее развитой поровой структуре. После введения ОГ10 адсорбционная ёмкость возрастает. Наиболее выраженное изменение наблюдается у ПЭТ-ОГ10 и ПЭ-ОГ10, где гистерезис становится более заметным.

Введение ПФ дополнительно увеличивает количество адсорбированного газа. Наиболее интенсивная адсорбция в области относительных давлений 0,4–0,8 связывается с развитием мезопор. Комбинация ОГ и ПФ даёт максимальный структурный эффект.

С точки зрения механизма ОГ может выполнять роль структурообразующего наполнителя, изменяющего пространственное распределение углеродных доменов, тогда как ПФ способствует созданию дополнительных каналов удаления летучих продуктов и предотвращает чрезмерное уплотнение углеродного остатка. Однако для подтверждения механизма необходимы SEM/TEM, Raman, XPS и DFT/NLDFT.

Современные исследования подтверждают сильную зависимость пористости пластиковых углеродов от температуры и способа активации. Для PET-derived carbons описаны как микропористые, так и иерархические микро-мезопористые структуры [2, С. 105386; 8, С. 68-80]. ПЭТ-700 имеет S = 50,04 м²/г, а ПЭ-700 85,59 м²/г (табл. 1, рис. 1). Следовательно, в базовом состоянии ПЭ-700 характеризуется большей удельной поверхностью. Это может быть связано с различиями в термодеструкции, но для установления причинно-следственной связи необходимы дополнительные структурно-химические исследования.



Рисунок 1. Удельная поверхность исследованных углеродных материалов

После введения ОГ10 S ПЭТ-ОГ10 возрастает до 318,76 м²/г, что примерно в 6,37 раза выше, чем у ПЭТ-700. Для ПЭ-ОГ10 значение составляет 420,47 м²/г, то есть примерно в 4,91 раза выше, чем у ПЭ-700. Таким образом, ОГ существенно развивает поверхность обоих типов углеродного материала.

ПФ без ОГ увеличивает S ПЭТ-700+ПФ до 469,92 м²/г и ПЭ-700+ПФ до 420,47 м²/г. Значение для ПЭ-700+ПФ совпадает со значением для ПЭ-ОГ10; без первичного протокола измерения это значение не корректируется.

Наиболее высокий результат получен для совместной модификации. ПЭТ-ОГ10+ПФ имеет S-825,99 м²/г, а ПЭ-ОГ10+ПФ -1011,78 м²/г. Относительно исходных образцов это соответствует примерно 16,51- и 11,82-кратному росту соответственно.

Сравнение с современной литературой показывает, что 1011,78 м²/г является высоким, но не предельным значением. В обзоре 2024 года для пластиковых углеродов приводится диапазон до 2152 м²/г [2, С. 105386]; в 2025 году для PET-derived carbon сообщалось до 1313 м²/г [3, С. 107524], а в 2024 году 1571 м²/г для материала, ориентированного на суперконденсаторы [4, С. 12781-12795].

Таблица 1. Удельная поверхность и относительный рост

Образец	S, м²/г	Относительно базы	Рост, %
ПЭТ-700	50,04	1.00 раза	0.0 %
ПЭ-700	85,59	1.00 раза	0.0 %
ПЭТ-ОГ10	318,76	6.37 раза	537.0 %
ПЭ-ОГ10	420,47	4.91 раза	391.3 %
ПЭТ-700+ПФ	469,92	9.39 раза	839.1 %
ПЭ-700+ПФ	420,47	4.91 раза	391.3 %
ПЭТ-ОГ10+ПФ	825,99	16.51 раза	1550.7 %
ПЭ-ОГ10+ПФ	1011,78	11.82 раза	1082.1 %

Объём микропор по t-Plot возрастает от 0,050 см³/г для ПЭТ-700 и 0,085 см³/г для ПЭ-700 до 0,317 и 0,418 см³/г после введения ОГ10. Это показывает, что рост площади поверхности сопровождается развитием доступного микропорового пространства.

После введения ПФ значения возрастают ещё сильнее. Для ПЭТ-700+ПФ и ПЭ-700+ПФ получены 0,466 и 0,418 см³/г. При совместном использовании ОГ и ПФ достигаются 0,820 см³/г для ПЭТ-ОГ10+ПФ и 1,006 см³/г для ПЭ-ОГ10+ПФ.

Показатель Vb также возрастает: от 0,038 и 0,065 см³/г в базовых образцах до 0,631 и 0,774 см³/г для образцов с ОГ+ПФ. В рамках принятой терминологии эти данные отражают существенное развитие мезопоровой составляющей.

Иерархическая микро-мезопористость имеет практическое значение: микропоры обеспечивают большую поверхность и высокую потенциальную равновесную ёмкость, а мезопоры создают транспортные пути к внутренним участкам. Поэтому для очистки воды и газовой сорбции полезно не только максимизировать S, но и обеспечить оптимальный баланс размеров пор.

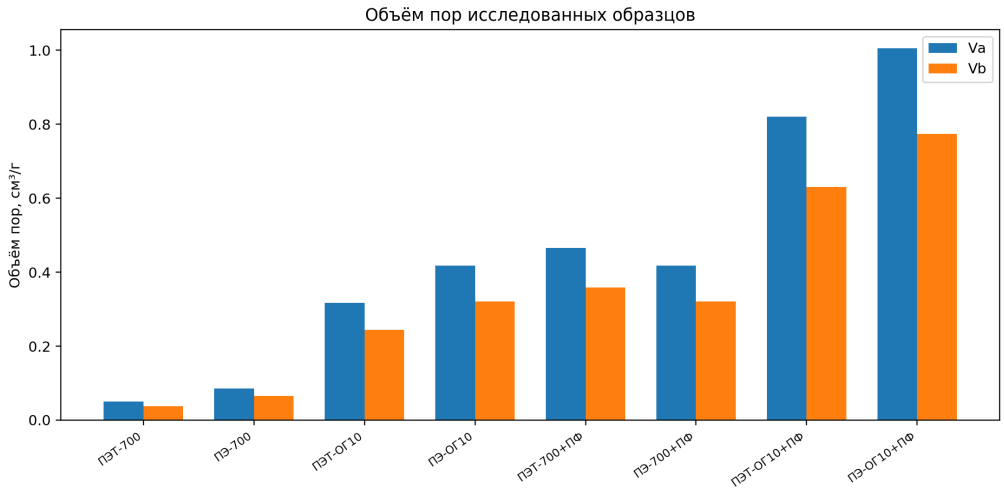


Рисунок 2. Объёмы пор Va и Vb в исследованных образцах

IUPAC подчёркивает, что BET-площадь в микропористых материалах является эффективным структурным показателем и требует осторожной интерпретации; для более детального анализа рекомендуется применять современные модели распределения пор, включая DFT-подходы [6, С. 1051-1069].

Графики Темкина показывают различия между базовыми и модифицированными образцами. Для ПЭТ-700 и ПЭ-700 наблюдается участок, близкий к линейному, что указывает на частичное соответствие модели. Умеренный наклон интерпретируется как относительно слабое взаимодействие азота с углеродной поверхностью, характерное для физической адсорбции.

Для ПЭТ-ОГ10 количество адсорбированного азота существенно выше. Это связывается с увеличением числа и размеров пор и изменением энергетической неоднородности поверхности. Для ПЭ-ОГ10 отмечается аналогичный тренд, хотя уровень адсорбции несколько ниже, чем для ПЭТ-ОГ10.

Для образцов с ПФ наблюдается увеличение адсорбционной ёмкости, особенно в области высоких относительных давлений. Это согласуется с ростом объёма мезопор. Для строгой оценки энергетики поверхности целесообразно дополнить Темкин-анализ моделями Langmuir/Freundlich для жидкофазной адсорбции и DFT для газовой адсорбции.

Базовый ПЭ-700 имеет более высокую S и объём микропор, чем ПЭТ-700. После введения ОГ и ПФ оба полимера демонстрируют выраженное развитие пористости. Максимальный показатель S получен для ПЭ-ОГ10+ПФ — 1011,78 м²/г.

Различия могут быть связаны с механизмами термодеструкции. В ранее выполненной работе показано, что при 1000 °C остаточная масса составляла около 45,3 % для ПЭ и 29,8 % для ПЭТ, что отражает различия в образовании и удалении летучих продуктов [1, с. 74-77].

Следовательно, выбор полимера является одним из факторов управления текстурой. Одновременно необходимо учитывать состав реальных отходов, наличие красителей, наполнителей, влаги и смешанных полимеров, поскольку эти примеси могут изменять выход и химическую природу углеродного продукта.

Обзор 2024 года показывает, что активированные угли из пластиковых отходов активно рассматриваются для очистки воды; наиболее изученными прекурсорами являются ПЭТ, отходы шин и смешанные пластики. Авторы также отмечают нерешённые вопросы гранулометрии, возможного вымывания компонентов, регенерации и стоимости [2, с. 105386]. Активированные угли из отходов ПЭТ-бутылок с развитой поверхностью применялись и для удаления загрязнителей из водных растворов [10, с. 522-535].

Работа 2025 года продемонстрировала PET-derived carbon с площадью поверхности до 1313 м²/г и применение материала в системе атмосферной водосборки с солнечной регенерацией [3, с. 107524]. Это показывает важность перехода от характеристики материала к испытанию в реальном устройстве.

В 2024 году активированный углерод из использованных ПЭТ-щитков исследовался как электродный материал гибких суперконденсаторов; сообщалась площадь поверхности 1571 м²/г и объём пор 1,64 см³/г [4, с. 12781-12795]. Тем самым один и тот же класс сырья может быть адаптирован к разным задачам за счёт изменения поровой структуры и химии поверхности.

В 2024 году также были получены магнитные мезопористые углеродные композиты на основе ПЭТ-отходов и кислых шахтных вод; для разных составов сообщались площади поверхности 404–936 м²/г. Материалы испытывались для удаления фармацевтических и других органических загрязнителей из воды [7, с. 34700-34718].

Полученное в настоящей работе значение 1011,78 м²/г находится в том же технологически значимом диапазоне. Однако сравнение только по S недостаточно. Практический сорбент должен обладать подходящим распределением пор, устойчивостью в рабочей среде, достаточной механической прочностью и возможностью многократной регенерации.

Современный контекст применения полученных результатов представлен в таблице 2.

Таблица 2. Современный контекст применения

Направление	Современные результаты	Связь с данной работой
Очистка воды	Пластиковые активированные угли активно изучаются для тяжёлых металлов и органических загрязнителей	Высокая S и развитая пористость создают основу для сорбции
Атмосферная вода	PET-carbon до 1313 м²/г; солнечная регенерация	Подтверждает прикладной потенциал PET-derived carbons
CO_2 capture	PET-based porous carbons применяются в газовой адсорбции	Микропористость важна для селективного поглощения
Суперконденсаторы	PET-derived carbon до 2150 м²/г	Показывает возможность энергетических применений

Наиболее перспективным по совокупности представленных текстурных параметров является ПЭ-ОГ10+ПФ: S = 1011,78 м²/г, Va = 1,006 см³/г и Vb = 0,774 см³/г. ПЭТ-ОГ10+ПФ также характеризуется высокой развитостью поверхности: S = 825,99 м²/г. Эти материалы целесообразно использовать как объекты для дальнейшего функционального тестирования.

Для очистки воды следует исследовать адсорбцию органических красителей, фенольных соединений, фармацевтических загрязнителей и ионов металлов при разных pH и концентрациях. Современный обзор показывает широкий диапазон применений пластиковых активированных углей и одновременно подчёркивает необходимость проверки регенерации и стабильности [2, с. 105386].

Для газовой адсорбции перспективны CO_2 и летучие органические соединения. Исследования PET-derived porous carbons демонстрируют возможность CO_2 capture [8, с. 68-80], а современные работы переходят к моделированию циклов адсорбции и регенерации [9, с. 125599].

Для повышения научной доказательности рекомендуется дополнить комплекс характеристик SEM/TEM, Raman, XRD, FTIR, XPS, элементным анализом и DFT/NLDFT. Особенно важны повторные измерения адсорбции–десорбции азота для оценки воспроизводимости.

Необходимо определить выход углерода, расход ОГ и ПФ, энергозатраты, механическую прочность, устойчивость к вымыванию и возможность многократной регенерации. Современные обзоры показывают, что именно стоимость и технологическая масштабируемость остаются важными барьерами промышленного внедрения [2, с. 105386].

Предлагаемая схема дальнейшего исследования: ПЭТ/ПЭ отходы → подготовка → карбонизация 700 °C → ОГ10 → ПФ → активация → N_2-адсорбция → BET/t-Plot/DFT → SEM/Raman/XPS → сорбционные испытания → регенерация → технико-экономическая оценка.

Заключение

Проведённый анализ показал, что модификация углеродных материалов из ПЭТ и ПЭ окисленным графитом и порофором является эффективным способом развития пористой структуры. Базовые образцы ПЭТ-700 и ПЭ-700 имеют S = 50,04 и 85,59 м²/г, тогда как совместная модификация ОГ+ПФ повышает этот показатель до 825,99 и 1011,78 м²/г.

Рост удельной поверхности сопровождается увеличением объёмов микро- и мезопор. Максимальные значения Va = 1,006 см³/г и Vb = 0,774 см³/г получены для ПЭ-ОГ10+ПФ. Это свидетельствует о формировании развитой иерархической пористой структуры.

Изотермы адсорбции–десорбции азота соответствуют типу IV с гистерезисом. Анализ Темкина показывает изменение адсорбционного поведения после модификации. Для окончательной оценки геометрии и энергетики пор рекомендуется использовать DFT/NLDFT и дополнительные спектроскопические методы.

Современные исследования подтверждают актуальность направления: PET-derived carbons с площадью поверхности от сотен до более 2000 м²/г рассматриваются для очистки воды, CO_2 capture, получения воды из воздуха и суперконденсаторов [2, С. 105386; 3, С. 107524; 4, С. 12781-12795; 8, С. 68-80]. Следовательно, полученный материал с S около 1000 м²/г обладает существенным потенциалом, однако его прикладная ценность должна быть подтверждена функциональными сорбционными испытаниями, регенерацией и технико-экономическим анализом.

Список литературы

1. Холиков К.А. и др. Исследование термической обработки ПЭТ и полиэтилена для получения углеродных материалов // Universum: технические науки. – 2025. – № 1 (130). – С. 74–77.
2. Pereira L., Castillo V., Calero M., Blázquez G., Solís R.R., Martín-Lara M.A. Insights into using plastic waste to produce activated carbons for wastewater treatment applications: A review // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Т. 62. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105386.
3. Galeano-Caro D., Medina O.E., Ríos A.A., Chejne F., Acelas N., Franco C.A., Cortés F.B. Novel activated carbon from polyethylene terephthalate (PET) waste for sustainable freshwater production // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – Т. 72. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107524.
4. Reddygunta K.K.R., Callander A. Šiller L., Faulds K., Berlouis L., Ivaturi A. Scalable slot-die coated flexible supercapacitors from upcycled PET face shields // RSC Advances. – 2024. – Т. 14, № 18. – P. 12781–12795. – DOI: 10.1039/D2RA06809E.
5. Kalbaev A., Abdikamalova A., Asqarova D., Khoshimov S., Paygamov R., Bakhronov K., Kholikov K., Salikhanova D., Jumaeva D., Eshmetov I., Maratov N., Mamataliev N. A Study of the Structural Features and Textural Properties of Carbon Sorbents Derived from Recycled Polyethylene Terephthalate and Polyethylene Waste // Journal of the Mexican Chemical Society. – 2026. – Т. 70, № 1. – DOI: 10.29356/jmcs.v70i1.2438.

6. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – T. 87, № 9–10. – P. 1051–1069. – DOI: 10.1515/pac-2014-1117.
7. Mvala B.A., Munonde T.S., Mpupa A., Bambo M.F., Matabola K.P., Nomngongo P.N. Valorization and Upcycling of Acid Mine Drainage and Plastic Waste via the Preparation of Magnetic Sorbents for Adsorption of Emerging Contaminants // ACS Omega. – 2024. – T. 9. – P. 34700–34718. – DOI: 10.1021/acsomega.4c03426.
8. Kaur B., Singh J., Gupta R.K., Bhunia H. Porous carbons derived from polyethylene terephthalate (PET) waste for CO_2 capture studies // Journal of Environmental Management. – 2019. – T. 242. – P. 68–80.
9. Li S., Cho M.-K., Yuan X., Deng S., Li H., Zhao L., Zhao R., Wang Y., Wang J., Lee K.B. Cyclic performance evaluation of CO_2 adsorption using polyethylene terephthalate plastic-waste-derived activated carbon // Fuel. – 2023. – T. 331. – DOI: 10.1016/j.fuel. 2022.125599.
10. Mendoza-Carrasco R., Cuerda-Correa E.M., Alexandre-Franco M.F., Fernández-González C., Gómez-Serrano V. Preparation of high-quality activated carbon from polyethylene terephthalate (PET) bottle waste. Its use in the removal of pollutants in aqueous solution // Journal of Environmental Management. – 2016. – T. 181. – P. 522–535. – DOI: 10.1016/j.jenvman. 2016.06.070.

References

1. Kholikov K.A. i dr. [Study of Thermal Treatment of PET and Polyethylene for the Production of Carbon Materials] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2025. – No. 1 (130). – P. 74–77. (In Russ.).
2. Pereira L., Castillo V., Calero M., Blázquez G., Solís R.R., Martín-Lara M.A. Insights into using plastic waste to produce activated carbons for wastewater treatment applications: A review // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 62. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105386.
3. Galeano-Caro D., Medina O.E., Ríos A.A., Chejne F., Acelas N., Franco C.A., Cortés F.B. Novel activated carbon from polyethylene terephthalate (PET) waste for sustainable freshwater production // Journal of Water Process Engineering. – 2025. – Vol. 72. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.107524.
4. Reddygunta K.K.R., Callander A. Šiller L., Faulds K., Berlouis L., Ivaturi A. Scalable slot-die coated flexible supercapacitors from upcycled PET face shields // RSC Advances. – 2024. – Vol. 14, No. 18. – P. 12781–12795. – DOI: 10.1039/D2RA06809E.
5. Kalbaev A., Abdikamalova A., Asqarova D., Khoshimov S., Paygamov R., Bakhronov K., Kholikov K., Salikhanova D., Jumaeva D., Eshmetov I., Maratov N., Mamataliev N. A Study of the Structural Features and Textural Properties of Carbon Sorbents Derived from Recycled Polyethylene Terephthalate and Polyethylene Waste // Journal of the Mexican Chemical Society. – 2026. – Vol. 70, No. 1. – DOI: 10.29356/jmcs.v70i1.2438 [Электронный ресурс]. – URL: https://doi.org/10.29356/jmcs.v70i1.2438 (accessed: 07.10.2026).

6. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. – 2015. – Vol. 87, No. 9–10. – P. 1051–1069. – DOI: 10.1515/pac-2014-1117.
7. Mvala B.A., Munonde T.S., Mpupa A., Bambo M.F., Matabola K.P., Nomngongo P.N. Valorization and Upcycling of Acid Mine Drainage and Plastic Waste via the Preparation of Magnetic Sorbents for Adsorption of Emerging Contaminants // ACS Omega. – 2024. – Vol. 9. – P. 34700–34718. – DOI: 10.1021/acsomega.4c03426.
8. Kaur B., Singh J., Gupta R.K., Bhunia H. Porous carbons derived from polyethylene terephthalate (PET) waste for CO_2 capture studies // Journal of Environmental Management. – 2019. – Vol. 242. – P. 68–80.
9. Li S., Cho M.-K., Yuan X., Deng S., Li H., Zhao L., Zhao R., Wang Y., Wang J., Lee K.B. Cyclic performance evaluation of CO_2 adsorption using polyethylene terephthalate plastic-waste-derived activated carbon // Fuel. – 2023. – Vol. 331. – DOI: 10.1016/j.fuel. 2022.125599.
10. Mendoza-Carrasco R., Cuerda-Correa E.M., Alexandre-Franco M.F., Fernández-González C., Gómez-Serrano V. Preparation of high-quality activated carbon from polyethylene terephthalate (PET) bottle waste. Its use in the removal of pollutants in aqueous solution // Journal of Environmental Management. – 2016. – Vol. 181. – P. 522–535. – DOI: 10.1016/j.jenvman. 2016.06.070.