



Research Article

Received: March 16, 2025

Accepted: April 14, 2025

Published: May 7, 2025

ISSN 2304-6295

The sorption capacity of technical carbon obtained from the thermolysis of tires and mineral wool waste

Fomina, Ekaterina Viktorovna¹  Ageeva, Marina Sergeevna¹  Lupandina, Natalya Sergeevna¹ Klyuev, Sergey Vasilyevich¹  Antoshina, Natalia Viktorovna¹ Ognev, Mikhail Nikolaevich¹ Shamgulov, Roman Yurievich¹ 

¹ Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; fomina.katerina@mail.ru (F.E.V.); ageevams@yandex.ru (A.M.S.); ecnata@mail.ru (L.N.S.); klyuyev@yandex.ru (K.S.V.); antoshina.nata32@yandex.ru (A.N.V.); cowex@bk.ru (O.M.N.); shamguloff@mail.ru (SRY)

Correspondence:* email fomina.katerina@mail.ru

Keywords:

Municipal solid waste; carbon black; technogenic fibrous waste; car tire thermolysis; mineral wool waste; materials recycling; ecology

Abstract:

The object of the research is solid municipal waste in the form of carbon black obtained by thermolysis at a temperature of 450° C of automobile tires and finely ground fibrous materials obtained in a vibro-centrifugal unit from waste mineral basalt wool. The purpose of this work is to study the adsorption processes of purification of aqueous solutions, taking into account the physico-chemical characteristics of adsorbents from man-made raw materials. **Method.** The results of the physico-chemical properties of carbon black and fibrous material, microstructural, energy dispersion and granulometric analysis are presented. The adsorption processes in aqueous solutions containing heavy metals, dyes, oil and oil have been studied. **Results.** Adsorption properties with respect to heavy metals of nickel ions Ni²⁺. for fibrous material, A = 46 mg/g and Cp = 3000 mg/dm³ were calculated, and for carbon black, A = 38.5 mg/g. High adsorption properties of carbon black are observed in aqueous solutions containing the dye methylene blue with a degree of purification up to 98%. It is proved that the process of dye adsorption on carbon particles is of a monomolecular nature. Carbon black has sufficient oil capacity of 13.55 kg/kg of sorbent and oil capacity of 15.33 kg/kg of sorbent. It has been established that the processes of adsorption of petroleum products from aqueous solutions are influenced by the pH of the aqueous medium, temperature, exposure time and dosage of the adsorbent. Optimal indicators of COD have been established. The efficiency of the adsorption process was evaluated using real wastewater from an existing trucking company. The degree of purification for COD was 93.5%, for suspended solids – 70%, for petroleum products – 85%.

1 Introduction

Непрерывная глобальная урбанизация в сочетании с меняющимся городским образом жизни человека привели к значительному увеличению и накоплению твердых коммунальных отходов (ТКО). Объем образования ТКО в мире оценивается в 1,3 миллиарда тонн в год, по прогнозам, этот показатель достигнет 3,4 миллиарда тонн к 2050 году [1]. Одним из перспективных



направлений утилизации твердых коммунальных отходов является применение их в качестве вторичного сырья для получения сорбционных материалов для очистки сточных вод.

В качестве адсорбентов можно рассматривать технический углерод (твердый продукт пиролиза автомобильных шин) и волокнистые материалы (отходы производства утеплителей из минеральной базальтовой ваты).

Технический углерод является основным вторичным продуктом пиролиза отработанных шин, так как на его долю приходится около 35% от общего выхода продуктов [2]. Термический процесс пиролиза, это многообещающее решение утилизации автомобильных шин путем преобразования их в технический углерод [3]. В направлении поиска альтернативы дорогостоящих углеродсодержащих адсорбентов имеются исследования по использованию технического углерода в качестве сорбционного материала [4, 5]. Изучено использование адсорбента из технического углерода для удаления тяжелых металлов, красителей из сточных вод [6], органических веществ [7].

Пористый углерод, полученный в результате пиролиза и последующей модификации, имеет высокую степень очистки воды от ионов шестивалентного хрома Cr (VI), красителей [8], фенольных соединений [9]. В работе [10] технический углерод, неподверженный процессам модифицирования, продемонстрировал улучшенную адсорбцию нескольких легких редкоземельных элементов (La, Ce, Nd, Sm, Y). В работе [11] для пиролиза (при $T = 450^{\circ}\text{C}$) автомобильных шин использовали химическую модификацию с применением NaOH, CaO и Na_2CO_3 . Химическая модификация позволила получить углеродный адсорбент для удаления малахитовой зелени.

Активность технического углерода в адсорбционных процессах зависит от химического состава, морфологии поверхности, что в свою очередь определяется типом исходного сырья и условий пиролиза (тип реактора, температурный диапазон, скорость нагрева и время выдержки и т.д.), поэтому углеродный отход отличается непостоянством его состава [12]. Согласно литературным данным [13] при сравнении химических свойств и морфологических характеристик технического углерода, извлеченного при различных условиях пиролиза, установлено, что температура термообработки оказывает значительное влияние на формирование удельной поверхности и развитие микропористой структуры углеродных частиц, а также количественное содержание углерода и золы.

В данной статье уделено внимание техническому углероду, полученному при низкотемпературной ($T \leq 500^{\circ}\text{C}$) термолизной технологии переработки органических ТКО [14]. Несмотря на ряд недостатков, термолиз, в отличие от процессов сжигания, дает возможность получения промышленных продуктов, используемых для дальнейшей переработки. Продуктами, получаемыми в результате термической переработки резинотехнических изделий по данной технологии, являются: 1) углеводородное топливо ($Q_{\text{жуг}} = 10500$ ккал/кг); 2) технический углерод ($Q_{\text{тг}} = 5600$ ккал/кг); 3) термолизный газ ($Q_{\text{гг}} = 3500$ ккал/кг).

В качестве волокнистого материала для получения сорбента рассматриваются отходы производства базальтовой минеральной ваты (отход производства минераловатного утеплителя «Извол»). Этот тонкомолотый волокнистый материал (ТВМ) предварительно измельчали и гомогенизировали на вибрационно-центробежном устройстве с гибридным сепаратором в замкнутом цикле, что оказало воздействие на получение высокоразвитой морфологии поверхности тонкодисперсных волокон [15]. Дефектная поверхность дисперсных волокнистых частиц отличается активностью при получении строительных материалов, в частности вяжущих щелочной активации [16], а также в составе сырьевой смеси фибробетона [17].

Отходы минеральной ваты, образуемые как в процессе сноса зданий и сооружений, так и в процессе производства, относят к одним из крупнейших в мире твердых отходов, их объем составляет 2,54 млн. тонн в год [18]. Универсальным теплоизоляционным материалом является минеральная вата, произведенная из горных пород габбро-базальтовой группы [19]. Большая часть использования отхода приходится на адсорбирующие материалы [20]. Вовлечение отходов минеральной ваты в качестве вторичного сырья для получения сорбентов, обусловлено высокой сорбционной емкостью материалов волокнистой структуры. Отмечается высокая абсорбционная способность к очистке воды от нефтепродуктов [21], тяжелых металлов [22]. Для расширения спектра применения отхода минеральной ваты в качестве адсорбента и получения новых знаний его участия в процессах адсорбции в данной работе рассматривается влияние предварительной обработки волокнистого отхода в вибро-центробежном агрегате.



2 Materials and Methods

Удельную поверхность и средний размер частиц определяли методом воздухопроницаемости с использованием прибора ПСХ-12 SP, усредняющего размеры частиц (диапазон измерений 200–50000 см²/г).

Микроструктуру материалов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU (Брно, Чехия).

Гранулометрический состав всех дисперсных материалов исследовали с помощью дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoТес plus (область измерения 0,01–2000 мкм) (Fritsch GmbH, Германия).

Насыпную плотность $\rho_{\text{нас}}$ определяли путем взвешивания известного объема материала и делением найденной массы на объем.

Истинная плотность установлена пикнометрическим методом.

Для определения pH водной вытяжки к 100 мл дистиллированной воды с pH≈7 добавляли 10 г ТУ, содержимое лабораторной емкости кипятили в течение 30 мин, фильтровали через бумажный фильтр, в фильтрате определяли значение pH на pH-метре. Кислотность раствора изменяли с применением соляной кислоты, для образования щелочной среды использовали NaOH.

В качестве поллютанта использовались ионы Ni²⁺, модельные растворы готовились путем растворения навески соли NiSO₄·7H₂O, квалификации «хч». Соль взвешивалась на аналитических весах с точностью до 0,0002 г и растворялась в дистиллированной воде с pH=7. Концентрация ионов Ni²⁺ определялась на спектрофотометре «КФК-3». Концентрация ионов Ni²⁺ используемых растворов составляла от 10 до 4000 мг/дм³. Исследование равновесных характеристик адсорбции (при построении изотерм адсорбции) проводилось в статических условиях при постоянной температуре (T = 293K) на модельных никельсодержащих растворах. Навеску сорбента массой 1 г помещали в стеклянные колбы объемом 250 см³. Затем в них добавлялось 100 см³ раствора, который содержал ионы Ni²⁺ заданных концентраций. Колбы с навесками плотно закрывались пробками и встряхивались в течение 24 часов. Через бумажный фильтр марки «Синяя лента» (ТУ6-09-1678-95) раствор отфильтровывали. В фильтратах определялись равновесные концентрации ионов Ni²⁺ фотометрическим методом на фотоколориметре марки «КФК-2П». По формуле рассчитывалась сорбционная емкость:

$$A = (C_{\text{н}} - C_{\text{к}})V/m, \quad (1)$$

где $C_{\text{н}}$ – начальная концентрация ионов в растворе, мг/л; $C_{\text{к}}$ – конечная концентрация ионов в растворе после равновесия, мг/л; V – объем раствора, л; m – масса навески, г.

Эффективность очистки водных растворов оценивали в соответствии с формулой 2:

$$\mathcal{E}_{\text{оч}} = \frac{C_{\text{нач}} - C_{\text{оч}}}{C_{\text{нач}}} \times 100, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_{\text{оч}}$ - эффективность очистки (%); $C_{\text{нач}}$ - концентрация загрязняющего компонента в водном растворе (мг/л); $C_{\text{оч}}$ - концентрация загрязняющего компонента в очищенной воде (мг/л);

Оценку нефтеемкости определяли с помощью сетки-ловушки [22].

Определение концентрации нефтепродуктов проводили по гравиметрическому методу [23].

3 Results and Discussion

Технический углерод, полученный при термоллизе автомобильных шин, представляет собой сухой твердый порошок черного цвета (Рис. 1, а).

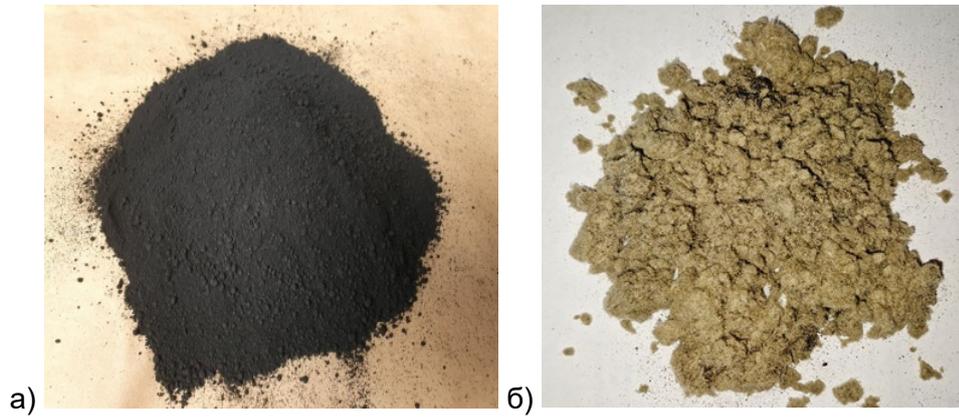


Рис. 1 – Отходы ТКО: а – технический углерод; б – тонкомолотый волокнистый материал
 Fig. 1 – MSW waste: a – carbon black; b – finely ground fibrous material

С помощью энергодисперсионного анализа (Рис. 2) проведены исследования химического состава поверхности частиц технического углерода.

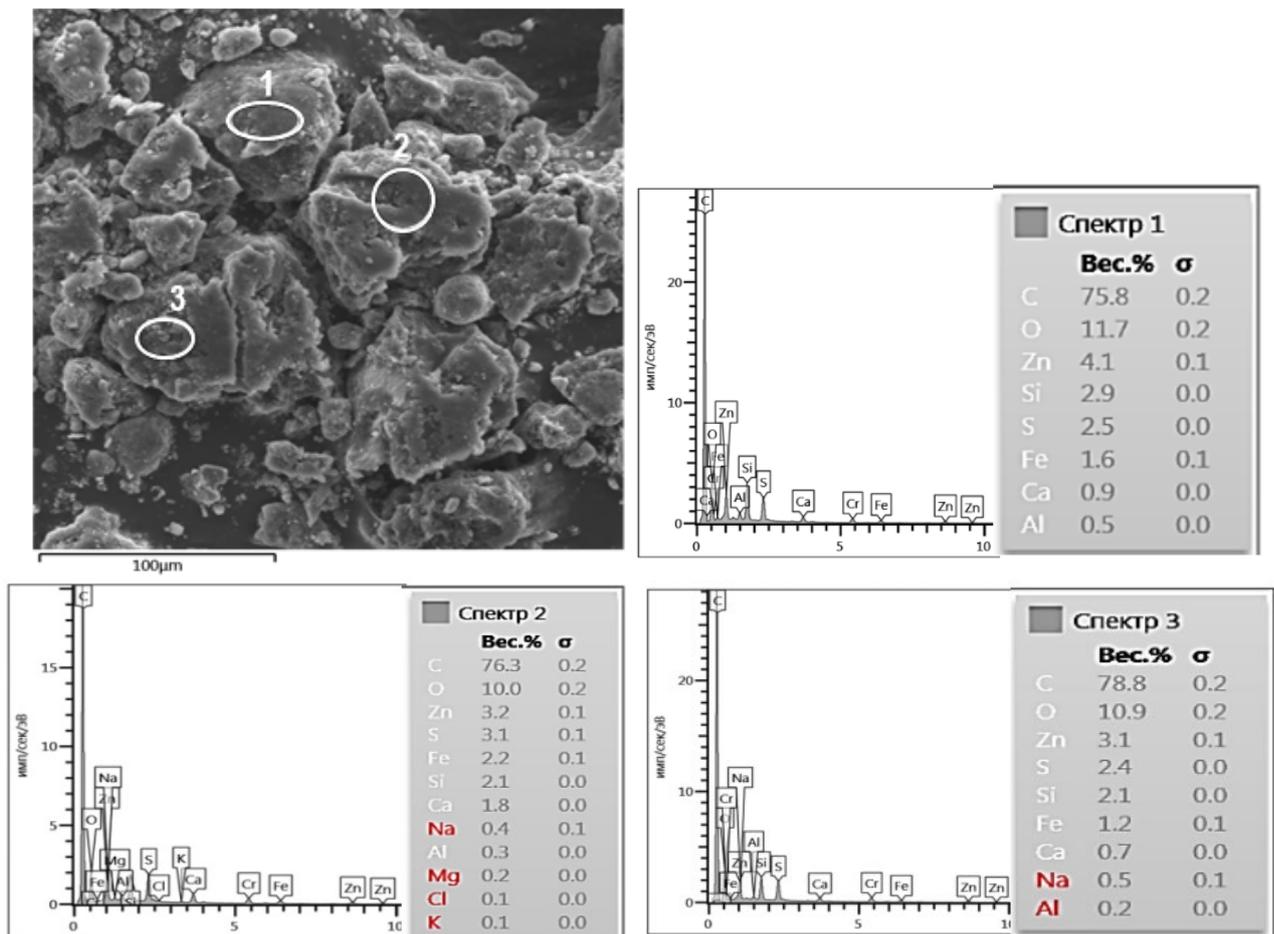


Рис. 2 – Энергодисперсионный анализ технического углерода
 Fig. 2 – Energy dispersion analysis of carbon black

Согласно полученным данным, содержание углерода в переработанной саже составляет более 70%, содержание кислорода 12%, а также присутствуют цинк, железо, сера, кремний и другие элементы. В табл. 1 отражены физико-химические свойства технического углерода.

Таблица 1 – Физико-химические параметры технического углерода
 Table 1 – Physico-chemical parameters of carbon black

Параметр	Значение
Удельная поверхность, м ² /г	60.4

Диаметр частиц, мкм	155
pH водной вытяжки	8
Насыпная плотность, кг/м ³	300
Истинная плотность, кг/м ³	990

Исследуемый технический углерод был получен при термолизе с температурой 450°C и его удельная поверхность составляет 60.4 м²/г. Сопоставляя эти данные с работой [12], температура пиролиза оказывает прямое влияние на удельную поверхность углеродных частиц, так при температуре пиролиза 425°C удельная поверхность пиролизной сажи составила 46.5 м²/г, с повышением температуры пиролиза до 600°C, удельная поверхность увеличивается до 116.30 м²/г. Причина заключается в том, что с повышением температуры термолиза углеводороды на поверхности углерода разлагаются со снижением образования кокса.

Согласно анализу гранулометрии средний диаметр частиц технический углерод составляет 155 мкм.

На Рис. 3 показаны микрофотографии при различном увеличении, где отражено, что агрегированные частицы технического углерода имеют средний размер 100–150 мкм.

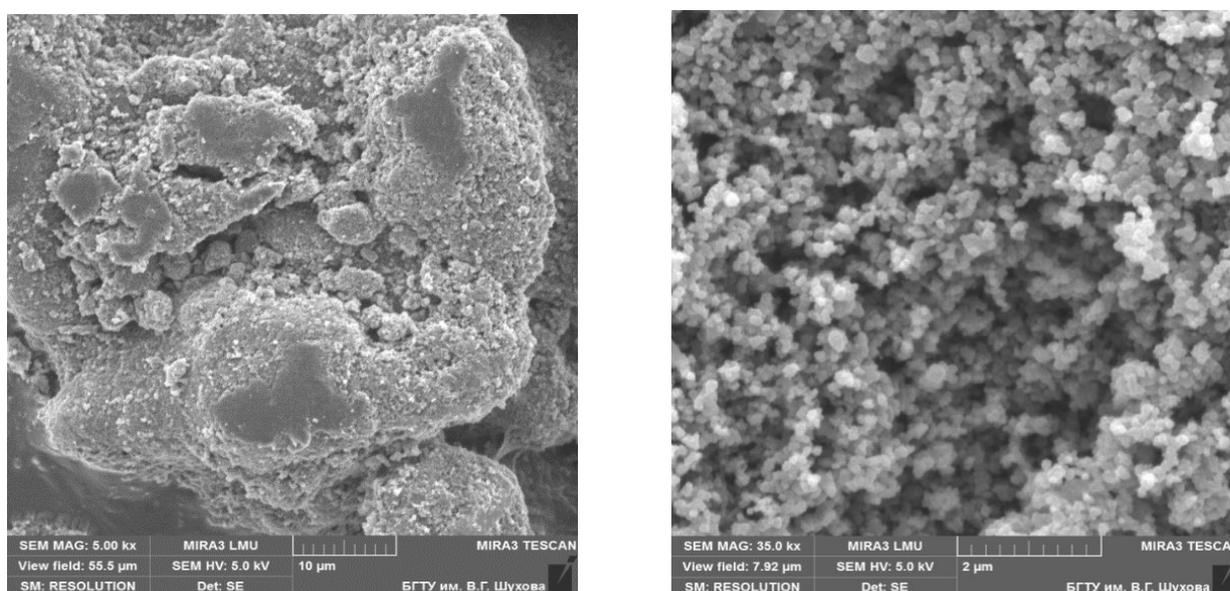


Рис. 3 – СЭМ анализ технического углерода
Fig. 3 – SEM images for carbon black

Агрегаты сгруппированы наноразмерными частицами 10–20 нм, близкими к сферической форме. Размер частиц в нанометровых масштабах определяет его высокую дисперсность. Внешний вид отхода в виде сферических нанометрических частиц. В научной литературе [8] отмечается, что дисперсия частиц во многом определяется их свободной поверхностной энергией, а также полярной и дисперсионной частями их компонентов.

Внешний вид тонкомолотого волокнистого материала представлен на Рис. 1, б. Свойства тонкомолотого волокнистого материала отражены в табл. 2.

Таблица 2 – Свойства отхода минеральной ваты
Table 2 – Properties of finely ground fibrous material

Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Удельная поверхность, м ² /кг
1129–1366	2804–2884	160–180

На микрофотографиях (Рис. 4) показано, что частицы отходов минеральной ваты представлены разнообразными по размеру и длине волокнами преимущественно цилиндрической формы.

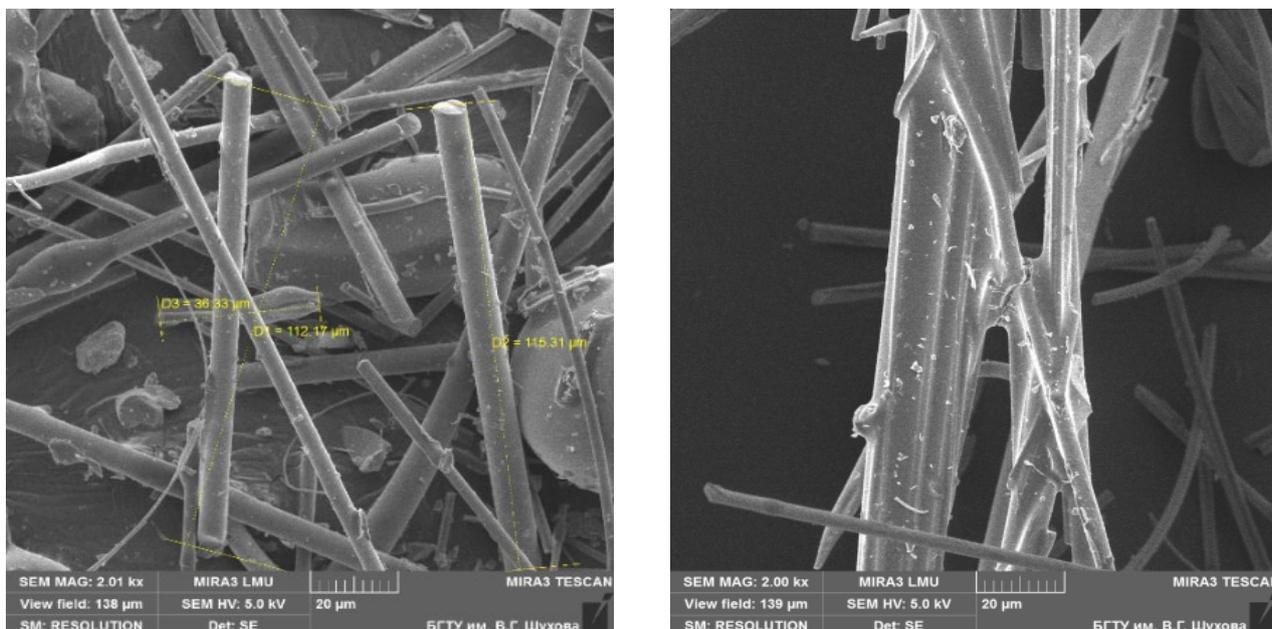


Рис. 4 – Микроструктура частиц тонкомолотого волокнистого материала
Fig. 4 – Microstructural analysis of finely ground fibrous material

Общая масса ТВМ имеет рыхлую структуру, состоящую из перекрещивающихся волокон, где наряду с минеральным волокном образуются так называемые «корольки» – сферические, каплеобразные частицы из застывшего расплава. Поверхность волокон имеет дефекты в виде неровностей и каверн.

Адсорбционную способность отходов ТКО исследовали по адсорбции ионов никеля Ni^{2+} из модельных растворов. Ионы никеля Ni^{2+} являются распространенными ионами тяжелых металлов, которые присутствуют в промышленных и муниципальных сточных водах. Они относятся к токсичным загрязнителям при накоплении которых в водных экосистемах и почве создаются негативные условия для здоровья человека и окружающей среды [24].

По результатам экспериментальных данных построена изотерма адсорбции ионов никеля Ni^{2+} (Рис. 5). Отмечается, что с увеличением начальной концентрации сорбента (C_p) адсорбция ионов тяжелого металла возрастает.

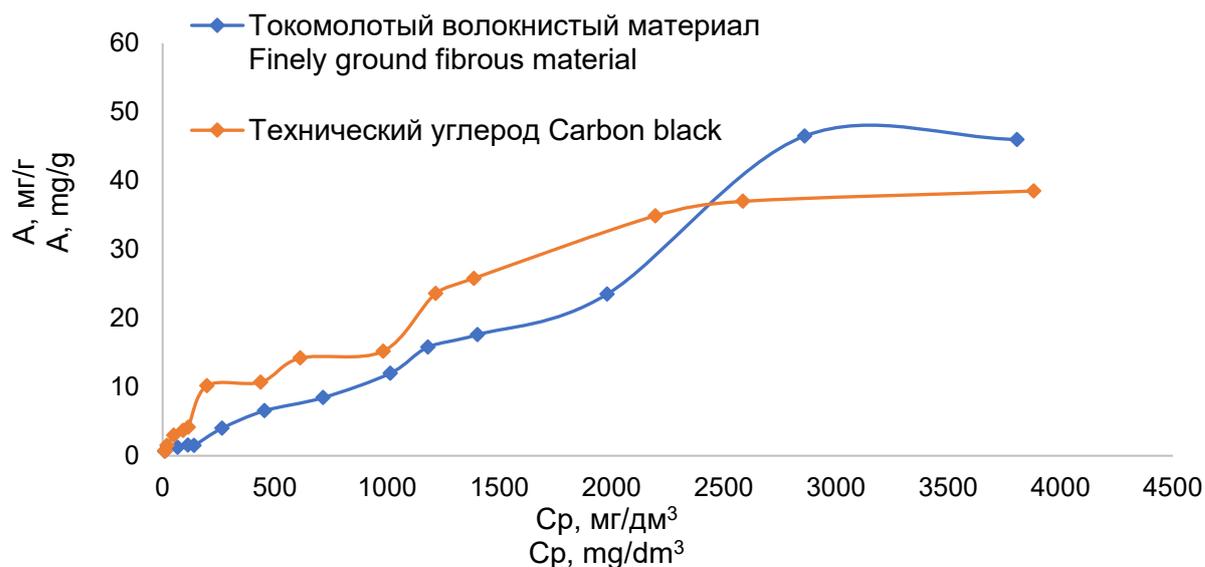


Рис. 5 – Изотермы адсорбции ионов Ni^{2+}
Fig. 5 – Adsorption isotherms of Ni^{2+} ions

Image by the author of the article

Наибольшее значение сорбционной емкости $A = 46$ мг/г достигаются в случае использования ТВМ при $C_p = 3000$ мг/дм³. Частицы ТВМ имеют высокоразвитую поверхность за счет впадин, неровностей, зазубрин, именно на такие зоны присоединяются молекулы адсорбирующихся веществ, что согласуется с данными [24]. В случае использования технического углерода максимальная сорбционная емкость составила $A = 38,5$ мг/г при $C_p = 3000$ мг/дм³. ТУ имеет $pH = 8$, что изменяет среду в щелочную сторону и должно положительно влиять на гидратообразование $Ni(OH)_2$ при $pH > 7,7$ [25]. Однако, при применении технического углерода для очистки водных растворов от тяжелых металлов не достигаются высокие показатели. В работе [26] также отмечаются не высокие показатели по отношению к ионам тяжелых металлов. При этом указано, что в процессе удаления растворенных ионов тяжелого металла свойства поверхности играют важную роль, поэтому высокоразвитая поверхность и наличие макро- и мезопор обеспечивают техническому углероду сорбционную активность. Согласно данным работы [27] в водных растворах низкие показатели адсорбции техническим углеродом тяжелых металлов связаны с наличие органических примесей в структуре углеродных частиц, которые образуются в процессе термопиролиза.

Технический углерод исследовали в качестве адсорбента модельных растворов, содержащих краситель метиленовый синий. В работе использовались концентрации красителя 25 и 50 мг/л. Степень очистки водного раствора содержащего краситель от влияния массы сорбента отражены графически на Рис. 6.

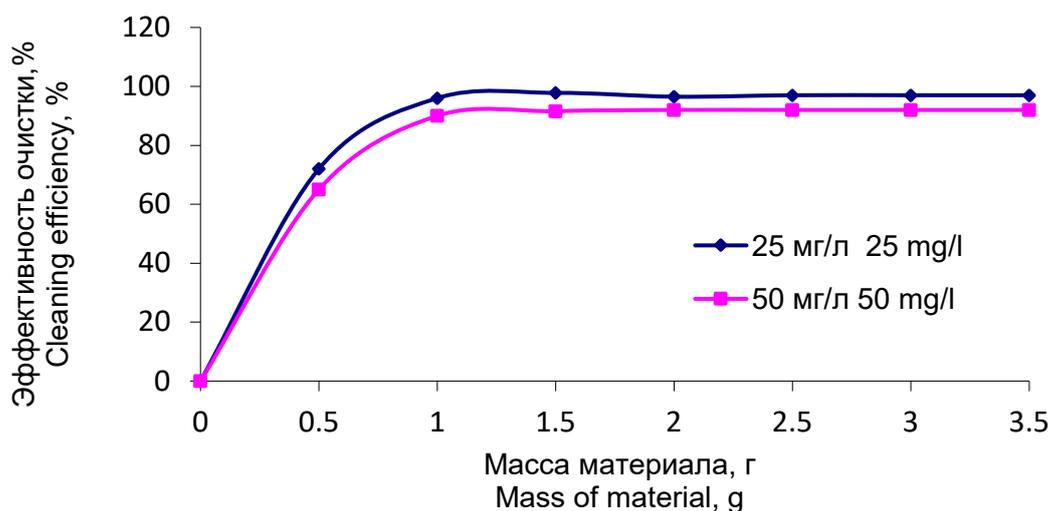


Рис. 6 – Эффективность очистки красителя МС от массы добавки для растворов с концентрациями 25 и 50 мг/л ($T = 20$ °С; $t = 10$ мин)

Fig. 6 – The efficiency of dye MB purification from the mass of the additive for solutions with concentrations of 25 and 50 mg/l ($T = 20$ °C; $t = 10$ min)

Image by the author of the article

Установлено, что максимальная эффективность очистки модельных растворов с концентрацией 25 и 50 мг/л достигается при добавлении 1 г отхода и составляет 92–98%. При повышении количества адсорбента свыше 1 г существенного влияния на достигнутые показатели степени очистки не происходит.

Изотермы адсорбции и десорбции процесса очистки красителя МС в водных растворах при использовании в качестве адсорбента технического углерода представлены на рис. 7.

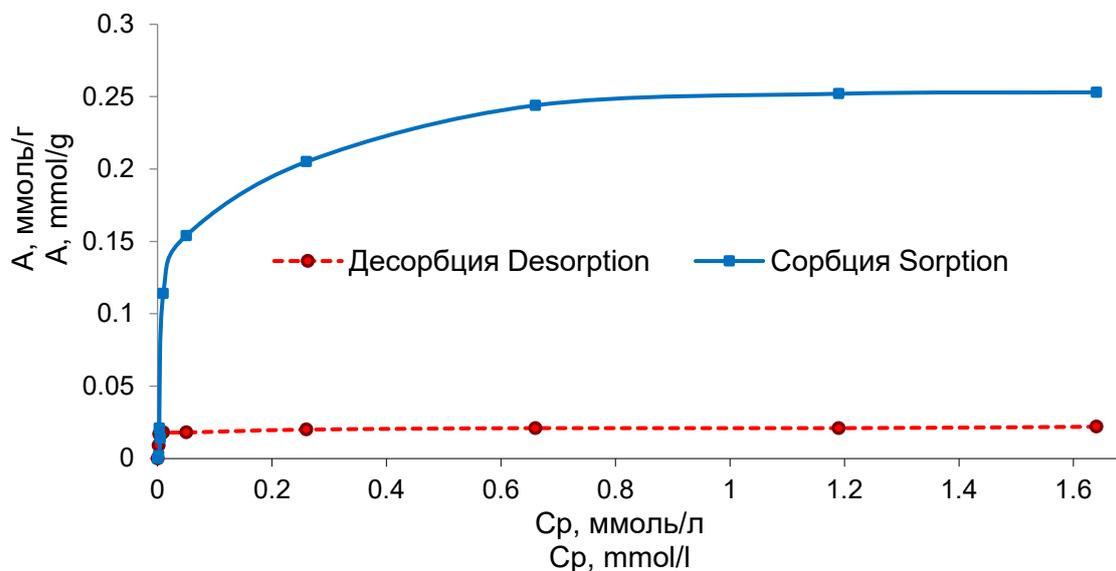


Рис. 7 – Изотермы сорбции и десорбции
Fig. 7 – Sorption and desorption isotherms
Image by the author of the article

Согласно построенной изотерме сорбции, взаимодействие МС с адсорбентом соответствует теории мономолекулярной адсорбции Ленгмюра. Основываясь на данной теории адсорбция происходит не на всей поверхности адсорбента, а лишь в отдельных ее точках, что характерно для микропористого углеродного материала с диаметрами пор больше 1,5 нм [28].

Технический углерод исследовался в качестве сорбционного материала для очистки сточных вод от нефтепродуктов. Целевыми показателями для данного вида очистки являются нефтеемкость и маслосорбция. Нефтеемкость - это главное физическое свойство сорбента используемого для очистки водных растворов от нефти. Под нефтеемкостью подразумевается масса нефтепродукта, которую способен поглотить 1 г сорбента. Согласно полученным результатам технический углерод имеет высокие показатели по нефтеемкости с результатом 13.55 кг/кг адсорбента. Маслосорбция составляет 15.33 кг/кг. Для сравнения в таблице 3 приведены показатели нефтеемкости сорбентов, предлагаемых на Российском рынке.

Таблица 3 – Оценка нефтеемкости сорбентов нефтеочистки
Table 3 – Evaluation of the oil-holding capacity of market-based oil-cleaning sorbents

Сорбент (торговое название)	Нефтеемкость, кг/кг	Источник
Профсорб-Эко (ООО «Терра Экология», Россия)	2.8–7	[29]
Экосорб (ГК «Реал сорб», Россия)	8–20	[30]
Ирвелен М (Холдинговая компания Меншен групп, Россия)	10–25	[31]
Peat Sorb (Managed Specialty Services, LLC, Канада)	4–6	[32]
Sorbent «Newsorb» (ООО «ЛАРН 32», Россия)	4.6–9	[33]

Таким образом, рассматриваемый технический углерод может расширить спектр экономически выгодных нефтесорбентов.

В работе использовались модельные растворы, содержащие нефтепродукты в концентрациях 5 и 10 мг/дм³. К раствору объемом 1 дм³ добавляли технический углерод, дозировку варьировали в интервале от 0.5 до 5 г. Время перемешивания суспензии составляло 15 мин.

Согласно результатам, отраженным на Рис. 8, эффективность очистки возрастает при добавлении адсорбента от 0,5 до 4 г и составляет 85 и 74%, далее степень очистки повышается незначительно, и, следовательно, увеличение количества адсорбента нецелесообразно.

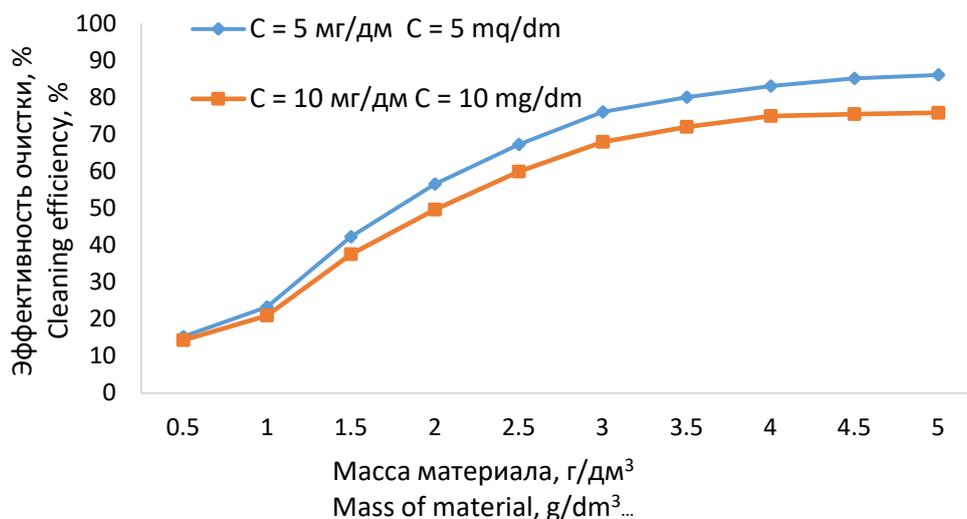


Рис. 8 – Зависимость эффективности очистки растворов от массы технического углерода
Fig. 8 – Dependence of the cleaning efficiency of solutions on the mass of the carbon black
Image by the author of the article

Взаимодействие нефтепродуктов с техническим углеродом можно объяснить следующими процессами. Нефтепродукты, как и углеродсодержащие частицы, являются гидрофобными веществами. Поскольку сродство гидрофобных частиц нефтепродуктов и технического углерода к воде меньше, чем между собой, то при соответствующих условиях (перемешивание, pH среды) они соединяются в глобулы. Укрупнение глобул приводит к повышению их плотности, что позволяет частицам оседать с образованием осадка [34].

Продолжительность процесса адсорбции определяется в основном диффузией, т.е. переносом вещества между сорбентом и раствором. Если адсорбция на открытой поверхности не мгновенна, то такой процесс происходит во внешнедиффузионной области, при этом законы диффузии не специфичны. В случае же пористых адсорбентов, кроме внешней диффузии, важную роль приобретает внутренняя диффузия, т.е. перенос адсорбтива в порах адсорбента при наличии в них градиента концентрации адсорбтива.

Существенным фактором влияния на химический состав раствора и активность функциональных групп поверхности адсорбента оказывает уровень pH. При проведении многофакторного эксперимента строили матрицу планирования. Переменными параметрами выступали степень очистки, pH водной среды, продолжительность процесса взаимодействия (Рис. 9).

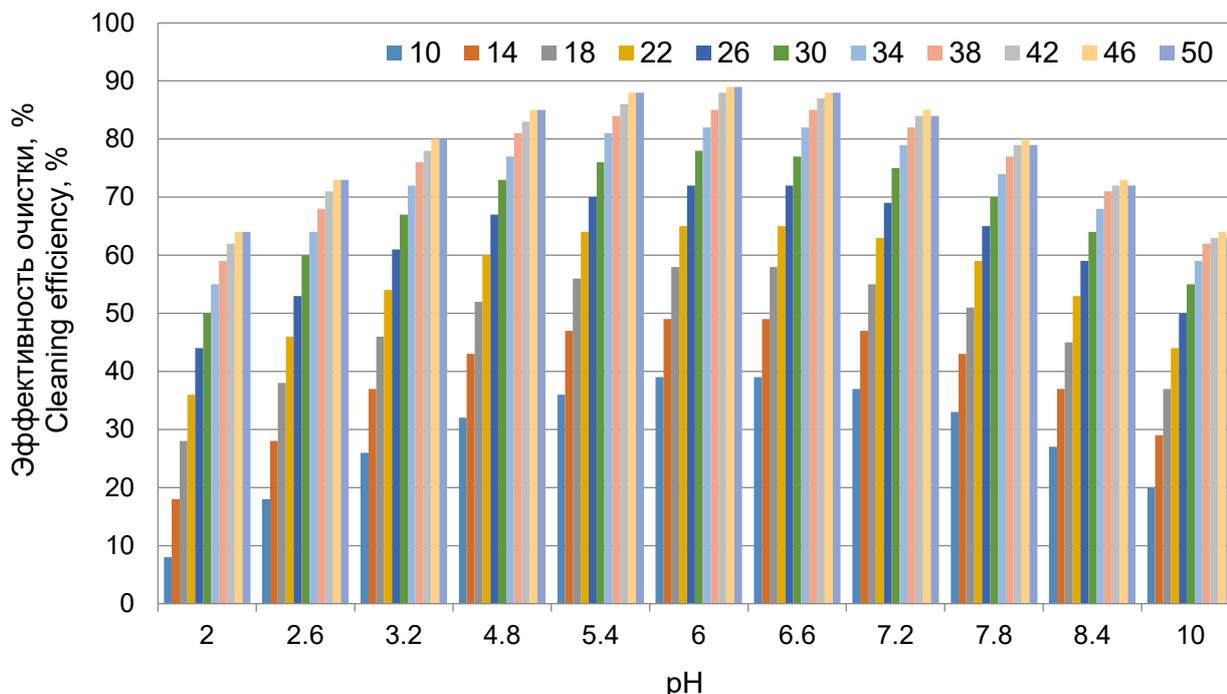


Рис. 9 – Диаграмма зависимости адсорбционной способности технического углерода от pH среды и продолжительности процесса взаимодействия

Fig. 9 – Diagram of the dependence of the adsorption capacity of carbon black on the pH of the medium and the time of the interaction process

Image by the author of the article

Сравнивая полученные результаты, представленные на диаграмме (Рис. 9) благоприятные условия работы адсорбента при максимальной степени очистки (90%) водного раствора от нефтепродуктов отмечаются в подкисленной среде pH = 6 и продолжительности процесса в течении 25 мин. Повышение значений pH в диапазоне 8–12 способствует снижению степени очистки. В диапазоне pH = 8–11 эффективность очистки технического углерода имеет средние значения.

В рамках проведенных работ степень очистки водных растворов от нефтепродуктов определяли по показателю загрязненности ХПК. Химическая потребность в кислороде – это показатель органических соединений, присутствующих в сточных водах [35]. Также, изучали влияние температуры процесса адсорбции на растворимость адсорбирующегося компонента.

Для более точного анализа проведена серия экспериментов с трехкратной повторностью. Результаты эксперимента показаны графически на Рис. 10.

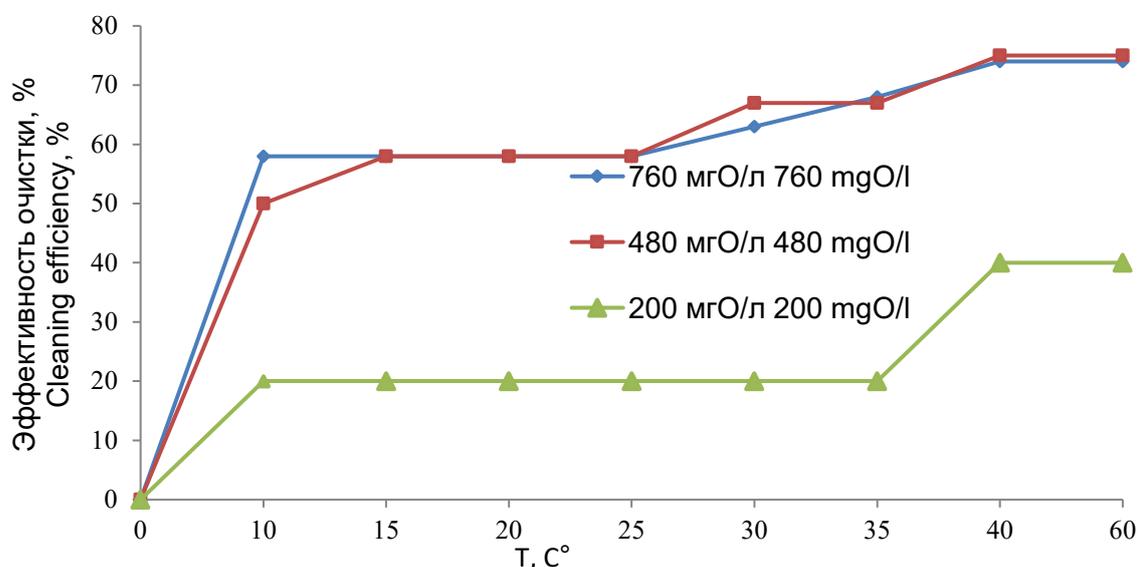




Рис. 10 – Зависимость эффективности очистки модельных растворов от температуры при разных значениях ХПК_{исх.}

Fig. 10 – Dependence of the cleaning efficiency of model solutions on temperature at different values COD Image by the author of the article

В диапазоне температур 30–40°C эффективность очистки максимальна и она составляет для ХПК 760 мгО/л – 74,0%, 480 мгО/л – 74%, 200 мгО/л – 40%. Дальнейшее повышение температуры нецелесообразно, так как оно ведет к снижению процесса очистки водного раствора.

Для проведения эксперимента адсорбции на реальных сточных водах, загрязненных нефтепродуктами, стоки отбирались в пробоотборные емкости на автотранспортном предприятии АО «ИТЕКО РЕСУРС» (г. Белгород, Россия). Количество сорбента составляло 10 г/л.

Таблица 4 – Показатели нефтеочистки сточных вод автотранспортного предприятия адсорбентом из технического углерода

Table 4 – Performance of oil-purification of wastewater from a motor transport enterprise by an adsorbent from carbon black

Показатель, ед. измерения	До очистки	После очистки	Эффективность очистки, %
ХПК, мгО/л	131,1	6,2	93,5
Взвешенные вещества, мг/л	30,1	9,0	70
Нефтепродукты, мг/л	0,9	0,14	85

Эффективность процесса адсорбции по ХПК составила – 93,5%, по взвешенным веществам – 70%, по нефтепродуктам – 85%.

Данное исследование направлено на поиск экономичных, конкурентоспособных сорбентов и вносит вклад в развитие экономики замкнутого цикла.

4 Conclusions

1. Технический углерод, полученный при низкотемпературном (450°C) термоллизе автомобильных шин, отличается наличием дисперсных частиц с высокоразвитой удельной поверхностью 60.4 м²/г. Наноразмерные частицы 10–20 нм сгруппированы в агрегаты размером 100–150 мкм.

2. История предварительной обработки ТВМ в вибро-центробежном агрегате (измельчение и гомогенизация) оказала влияние на формирование дефектной поверхности волокон в виде неровностей и каверн с повышением активности дисперсных частиц.

3. Высокорастворимая поверхность волокнистых частиц отличается активностью в процессах адсорбции тяжелых металлов. Значение сорбционной емкости при этом составили $A = 46$ мг/г при $C_p = 3000$ мг/дм³. Более низкие показатели адсорбционной способности ($A = 38,5$ мг/г) технического углерода по отношению к ионам тяжелых металлов связаны с содержанием в структуре углеродных частиц органических примесей образующихся при термоллизе.

4. Эффективность применения технического углерода в качестве адсорбента для удаления красителей из водных растворов подтверждается степенью очистки до 98%, при этом процесс носит мономолекулярный характер, что соответствует микропористым материалам.

5. Показатели технического углерода по нефтеемкости составляют 13,55 кг/кг, маслосорбности – 15,33 кг/кг. Данные показатели конкурируют с некоторыми нефтесорбентами имеющимися на рынке. Средство гидрофобных частиц нефтепродуктов и технического углерода позволяет им соединяться в глобулы с повышением плотности коагулированных частиц и образованием осадка. По мере оседания глобул с ними оседают и взвешенные частицы.

6. Для нефтесодержащих эмульсий достаточное количество адсорбента из технического углерода составляет 4 г на 1 дм³ водного раствора. Благоприятные условия работы адсорбента при максимальной степени очистки (90%) водного раствора от нефтепродуктов отмечаются при pH = 6 и продолжительности процесса в течении 25 мин.

Fomina, E.; Ageeva, M.; Lupandina N.; Klyuev, S; Antoshina N.; Ognev M.; Shamgulov R.

The sorption capacity of technical carbon obtained from the thermolysis of tires and mineral wool waste; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 117 Article No 11701. doi: 10.4123/CUBS.117.1



7. Коэффициент очистки водной среды адсорбентом из технического углерода зависит от температуры при оптимальных значениях 30–40°C, в этом случае эффективность очистки максимальна и составляет для ХПК 760 мгО/л – 74,0%. Исследования, проведенные на реальных сточных водах автотранспортного предприятия, доказали эффективность процесса адсорбции технического углерода при следующих значениях: по ХПК – 93,5%, по взвешенным веществам – 70%, по нефтепродуктам – 85%.

5 Acknowledgements

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологии технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN2024-0002).

6 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Li S., Skelly S. (2023) Physicochemical Properties and Applications of Biochars Derived from Municipal Solid Waste: A Review. *Environmental Advances*, 100395. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100395>
2. Uttaravalli A.N., Dinda S., Kakara V.R., Raghavendra Rao A.V., Daida T. & Gidla B.R. (2022) Sustainable use of recycled soot (carbon black) for the cleaner production of value-added products: A compendium. *Chemical Engineering Journal Advances*, 1, 100324. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100324>
3. Costa S.M.R., Fowler D., Carreira G.A., Portugal I. & Silva C.M. (2022) Production and Upgrading of Recovered Carbon Black from the Pyrolysis of End-of-Life Tires. *Materials*, 15, 2030. <https://doi.org/10.3390/ma15062030>
4. Zang Z., Chou S., Zhao Q., Nie Y., Xin M., Li Z., Tian J. & Li B. (2025). A review of the production and application of mesoporous carbon and its potential as an excellent carrier for the adsorptive delivery of compounds. *Biochar*. 7. <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00439-1>
5. Feng X., Dong H., Yang H., Yao H., Hu S., Zhao H., Zhao S. & Sun C. (2023) Application of plasma modified pyrolytic carbon black in improving mechanical properties of natural rubber composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(29), e54061. <https://doi.org/10.1002/app.54061>
6. Ji D., Didi G., Yikun X., Zhaoqin H. & Peitao Z. (2022) The Use of Pyrolytic Char Derived from Waste Tires in the Removal of Malachite Green from Dyeing Wastewater. *Nanomaterials*. 12. 4325. <https://doi.org/10.3390/nano12234325>
7. Makarevich Y., Papin A. & Domru E. (2019) Use of Solid Carbon Residue of Tire Pyrolysis as an Adsorbent for Organic Substances Removal from Water. *E3S Web of Conferences*. 105.02027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502027>
8. Ahmad W., Qaiser S., Ullah R., Jan B M., Karakassides M.A., Salmas C.E., Kenanakis G. & Ikram R. (2021) Utilization of Tires Waste-Derived Magnetic-Activated Carbon for the Removal of Hexavalent Chromium from Wastewater. *Materials*, 14(1), 34. <https://doi.org/10.3390/ma14010034>
9. Trubetskaya A., Kling J., Ershag O., Attard T.M. & Schröder E. (2019) Removal of phenol and chlorine from wastewater using steam activated biomass soot and tire carbon black. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 846–856. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.061>
10. Smith Y.R., Bhattacharyya D., Willhard T. & Misra M. (2016) Adsorption of aqueous rare earth elements using carbon black derived from recycled tires. *Chemical Engineering Journal*, 296, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.082>
11. Zhang X., Wang T., Ma L. & Chang J. (2008) Vacuum pyrolysis of waste tires with basic additives. *Waste Management*, 28(11), 2301-2310. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.009>



12. Han W., Han D., Chen H. (2023) Pyrolysis of Waste Tires: A Review. *Polymers*, **15**, 1604. <https://doi.org/10.3390/polym15071604>
13. Glagolev, S.N., Sevost'yanov, V.S., Shein, N.T. i dr. Sposob nizkotemperaturnoj pererabotki organicheskikh tverdyh kommunal'nyh othodov i ustanovka dlya ego realizacii. Patent RF 2744225. 2021.
14. Sevost'yanov, V.S., Klyuev, S.V., Sevost'yanov M.V. [et al.] (2023) Module for Processing Industrial Waste in a Closed Cycle. *Russian Engineering Research*, **43(1)**, 72-75. <https://doi.org/10.3103/s1068798x23020211>
15. Klyuev A., Kashapov N., Klyuev S., Ageeva M., Fomina E., Sabitov L., Nedoseko I., Vatin N.I., Kozlov P. & Vavrenyuk S. (2023) Alkali-activated binders based on technogenic fibrous waste. *Case Studies in Construction Materials*. **18**, e02202. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02202>
16. Klyuev S., Sevostyanov V., Sevostyanov M., Fediuk R., Sabitov L., Ageeva M., Fomina E., Klyuev A., Protsenko A., Goryagin P., Babukov V. & Shamgulov R. (2022) Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber. *Case Studies in Construction Materials*, **16**, e01071. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01071>
17. Komkova A., Habert G. (2023) Optimal supply chain networks for waste materials used in alkali-activated concrete fostering circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, **193**, 106949 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106949>
18. Yliniemi J., Ramaswamy R., Luukkonen T., Laitinen O., Nunes de Sousa Á., Huuhtanen M. & Illikainen M. (2021) Characterization of mineral wool waste chemical composition, organic resin content and fiber dimensions: Aspects for valorization. *Waste Management*, **131**, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.06.022>
19. Hao W., Zhao X. (2021) Developing superhydrophobic rock wool for high-viscosity oil/water separation. *Waste Management*. **131**. 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.161>
20. Shyong Y.Z., Khalid N.H.A., Haron Z., Mohamed A., Md Tahir M., Hasyim S., & Saggaff A. (2021) Waste Mineral Wool and Its Opportunities - A Review. *Materials*. **14(19)**, 5777. <https://doi.org/10.3390/ma14195777>
21. Pallewatta S., Weerasooriyagedara M., Bordoloi S., Sarmah A.K. & Vithanage M. (2023) Reprocessed construction and demolition waste as an adsorbent: An appraisal. *Science of The Total Environment*, **882**, 163340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163340>
22. Chuhareva N.V., Rozhkova D.S. & Hadkevich I.A. (2012) Issledovanie nefteemkosti verhovogo torfa po otnosheniyu k tovarnoj nefi i gazovomu kondensatu. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, **5-3(5)**, 132–134.
23. Lur'e, Yu.Yu.(1984) Analiticheskaya himiya promyshlennyh stochnyh vod. Izdatel'stvo: Himiya, Moskva. 448
24. Shaikhiev I., Shaykhieva K., Sverguzova S. et al. (2022) Removing Pollutants from Sewage Waters with Ground Apricot Kernel Shell Material. *Materials*, **15(10)**. <https://doi.org/10.3390/ma15103428>
25. Jonker M.T.O., Koelmans A. (2004) Modeling Maximum Adsorption Capacities of Soot and Soot-like Materials for PAHs and PCBs. *Environmental Science and Technology*, **38(12)**, 3305-3309. <https://doi.org/10.1021/es035120w>
26. Zhou D.M., Wang Y.J., Wang H.W., Wang S.Q. & Min J. (2010) Cheng Surface-modified nanoscale carbon black used as sorbents for Cu(II) and Cd(II). *Journal of Hazardous Materials*, **174 (1–3)**, 34–39. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2009.09.012>
27. Shahrokhi-Shahraki R., Benally C., Gamal El-Din M. & Park J. (2021) High efficiency removal of heavy metals using tire-derived activated carbon vs commercial activated carbon: Insights into the adsorption mechanisms. *Chemosphere*, **264(1)**, 128455. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128455>
28. Arabi S., Sohrabi M.R. (2014) Removal of methylene blue, a basic dye, from aqueous solutions using nano-zerovalent iron. *Water Science and Technology*, **70(1)**, 24–31. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.189>
29. Terra Ecology: A sorbent of «PROFSORB EKO» for collecting oil products [An electronic resource]. <http://www.terra-ecology.ru> (date of application: 24.06.2025)



30. Scientific and production firm: Sorbent of «Unisorb» [An electronic resource]. <http://www.ecosorb.su>
31. Irvelen-M: The filtering material Irvelen-M [An electronic resource]. <https://irvelen.com>
32. Galblaub O.A., Shaykhiev I.G., Stepanova S.V. & Timirbaeva G.R. (2016) Oil spill cleanup of water surface by plant-based sorbents: Russian practices. *Process Safety and Environmental Protection*, **101**, 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.11.002>
33. Scientific and production firm: Sorbent "Newsorb" [An electronic resource]. <https://larn32.ru/catalog/detail6.htm>
34. Perederij M.A., Kurakov Yu.I., Malikov I.N. & Molchanov S.V. (2009) Sorbciya nefteproduktov uglerodnymi sorbentami. *Himiya tverdogo topliva*, **5**, 42–46. <https://doi.org/10.3103/S0361521909050073>
35. Hu Z., Grasso D. (2005) Water analysis. Chemical Oxygen Demand. *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*. 325–330. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00663-4>