



Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2026, Том 9, № 3 / 2026, Vol. 9, Iss. 3 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 544.723.21

DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-3-4

Адсорбция нефтепродуктов карбонизатом лузги семян подсолнечника

¹ Везенцев А.И.,

¹ Раздобарин А.Е. *,

² Труфанов Д.А.,

³ Кожухова Е.И.,

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

² ООО «Исследователь КМА», г. Старый Оскол,

³ Научный исследовательский центр «Курчатовский институт»,

* Ответственный автор E-mail: 1046335@bsuedu.ru

Аннотация: цели: в работе рассмотрена проблема загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами, и обосновывается возможность использования карбонизата лузги семян подсолнечника в качестве эффективного и экономически доступного адсорбента для тонкой очистки природных вод от нефтяных загрязнений.

Методы. Методом термического анализа (термогравиметрия и дифференциальная сканирующая калориметрия) исследованы физико-химические процессы пиролиза лузги семян подсолнечника в окислительно-воздушной и безкислородной (аргоновой) средах. Адсорбционные испытания проведены по ГОСТу № 33627-2015 с использованием сырой нефти месторождения Ямала и авиационного керосина марки ТС-1. Селективность адсорбента оценена в модельной системе «нефть-вода», десорбционные характеристики изучены методом гравиметрии при комнатной температуре.

Результаты. Установлены основные стадии термоокислительной деструкции и пиролиза лузги семян подсолнечника: дегидратация (до 248-254 °С), выделение летучих органических веществ (248-361 °С) и карбонизация (361-820 °С); выход твёрдого углеродного остатка в инертной среде (13,2%) в 2,5 раза выше, чем в воздушной. Показано, что поглощательная ёмкость карбонизата по сырой нефти достигает 1,84 г/г, по керосину – 1,11 г/г, что сопоставимо с известными адсорбентами из растительного сырья. Подтверждена селективность адсорбента в водной среде. Установлен двухстадийный характер десорбции керосина: быстрая потеря 9,3% за первые 1,5 часа и замедленная десорбция до 48 часов.

Выводы. Установлено, что карбонизат лузги семян подсолнечника демонстрирует высокую термическую стабильность, конкурентоспособную нефтеёмкость и селективность по отношению к нефтепродуктам. Исключение энергозатратной стадии активации позволяет значительно снизить себестоимость адсорбента. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования продуктов пиролиза лузги семян подсолнечника для создания эффективных средств ликвидации нефтяных загрязнений.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, керосин, адсорбент, утилизация, лузга семян подсолнечника, продукты пиролиза, термический анализ

Для цитирования: Везенцев А.И., Раздобарин А.Е., Труфанов Д.А., Кожухова Е.И. Адсорбция нефтепродуктов карбонизатом лузги семян подсолнечника // Chemical Bulletin. 2026. Том 9. № 3. 4. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-3-4

Поступила в редакцию: 9 апреля 2026 г.; Одобрена после рецензирования: 11 июня 2026 г.; Принята к публикации: 7 июля 2026 г.

Adsorption of petroleum products with sunflower seed husk carbonate

¹ Vezentsev A.I.,
¹ Razdobarin A.E. *,
² Trufanov D.A.,
³ Kozhukhova E.I.,

¹ Belgorod State National Research University,
² ООО "Issledovatel KMA", Stary Oskol,
³ National Research Centre "Kurchatov Institute",
* Corresponding author E-mail: 1046335@bsuedu.ru

Abstract: objectives: the paper addresses the problem of environmental pollution by oil and petroleum products and substantiates the possibility of using sunflower seed husk carbonizate as an effective and economically affordable adsorbent for the fine purification of natural waters from oil contamination.

Methods. The physicochemical processes of sunflower seed husk pyrolysis in oxidative-air and oxygen-free (argon) atmospheres were investigated by thermal analysis (thermogravimetry and differential scanning calorimetry). Adsorption tests were carried out in accordance with GOST No. 33627-2015 using crude oil from the Yamal field and TS-1 aviation kerosene. The selectivity of the adsorbent was evaluated in a model "oil-water" system, and desorption characteristics were studied by gravimetry at room temperature.

Results. The main stages of thermo-oxidative degradation and pyrolysis of sunflower seed husks were established: dehydration (up to 248-254 °C), release of volatile organic compounds (248-361 °C), and carbonization (361-820 °C); the yield of solid carbon residue in an inert atmosphere (13.2%) is 2.5 times higher than in air. The absorption capacity of the carbonizate was shown to reach 1.84 g/g for crude oil and 1.11 g/g for kerosene, which is comparable to known adsorbents from plant-derived raw materials. The selectivity of the adsorbent in an aqueous medium was confirmed. A two-stage nature of kerosene desorption was established: rapid loss of 9.3% within the first 1.5 hours, followed by slow desorption up to 48 hours.

Conclusions. It was found that sunflower seed husk carbonizate exhibits high thermal stability, competitive oil capacity, and selectivity towards petroleum products. The exclusion of the energy-intensive activation stage significantly reduces the adsorbent production cost. The obtained results indicate the promise of using pyrolysis products of sunflower seed husks for developing effective means of oil spill remediation.

Keywords: oil, petroleum products, kerosene, adsorbent, utilization, sunflower seed husks, pyrolysis products, thermal analysis

For citation: Vezentsev A.I., Razdobarin A.E., Trufanov D.A., Kozhukhova E.I. Adsorption of petroleum products with sunflower seed husk carbonate. Chemical Bulletin. 2026. 9 (3). 4. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-3-4

The article was submitted: April 9, 2026; Approved after reviewing: June 11, 2026; Accepted for publication: July 7, 2026.

Введение

Нефть и нефтепродукты являются одними из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды. При авариях на нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих объектах, а также во время транспортировки происходят разливы, которые наносят катастрофический ущерб экосистемам. В частности экологические катастрофы: разлив дизельного топлива в Норильске, мазута в Чёрном море и нефти в Персидском заливе. Нефтяная пленка нарушает газообмен в водных средах, что приводит к гибели флоры и фауны, а токсичные компоненты нефти, проникая в почву и грунтовые воды, делают их непригодными на десятилетия. В связи с этим, разработка эффективных методов ликвидации нефтяных загрязнений остается актуальной задачей современной экологии [1]. Традиционная ликвидация последствий разливов нефти базируется на механическом сборе с поверхности земли или воды. При наземных разливах применяется срезание загрязненного слоя грунта или его промывка. На водной поверхности основными методами ликвидации последствий загрязнения нефтепродуктами являются боновые заграждения (локализация пятна) в сочетании с механическим скиммированием – сбором толстого слоя нефти специальными насосами или устройствами. Однако эти методы эффективны лишь при большой толщине пленки (от 1 мм) и не используются для очистки

эмульсий и тонкодисперсных частиц нефтепродуктов, остающимися в толще воды. Адсорбенты, в частности углеродсодержащие осуществляют тонкую очистку нефти и нефтепродуктов из водной дисперсной среды, избирательно извлекая растворенные и эмульгированные углеводороды на молекулярном уровне.

Адсорбция относится к числу наиболее эффективных методов тонкой очистки водных сред от нефтепродуктов обеспечивая их локализацию и последующее извлечение. Среди многообразия адсорбентов особое место занимают углеродные материалы, в частности, активированные угли. Их ключевое преимущество заключается в развитой пористой структуре. Это позволяет им адсорбировать не только мелкие, но и крупные молекулы из тяжелых фракций нефти, что важно для ликвидации разливов. Однако, высокая адсорбционная способность активированных углей сопряжена со сложностью и дороговизной их производства, требующего стадии активации. В данной работе предлагается использовать карбонизат лузги семян подсолнечника - продукт, получаемый непосредственно после пиролиза. Исключение энергозатратной стадии активации позволяет значительно сократить технологические расходы, сохраняя при этом достаточный адсорбционный потенциал материала для эффективного сбора нефтепродуктов.

Широкому применению традиционных активированных углей часто препятствует их высокая стоимость. В этом контексте особую значимость приобретает поиск новых, дешевых и эффективных сырьевых источников для их производства. Одним из таких источников являются возобновляемые отходы агропромышленного комплекса. Ежегодно в мире образуются миллионы тонн растительных отходов, утилизация которых представляет собой самостоятельную экологическую проблему. Комплексная переработка семян подсолнечника сопряжена с образованием значительных объемов возобновляемых отходов, таких как лузга, жмых и шрот [2, 3].

Таким образом, направление, связанное с переработкой отходов сельского хозяйства в ценные углеродные материалы, является стратегически важным. Лузга семян подсолнечника – массовый отход маслоэкстракционной промышленности, обладающий высоким потенциалом для конверсии в адсорбенты благодаря своему лигноцеллюлозному составу [4, 5]. В последние годы активно исследуются возможности пиролиза и карбонизации отходов подсолнечника для получения пористых углеродных материалов, применяемых в адсорбционной очистке нефтепродуктов (дизельное топливо, сырой нефти) [6, 7, 8]. Пиролиз такой биомассы позволяет получить пористый углеродный материал, который может служить эффективным и недорогим адсорбентом нефти и нефтепродуктов [9].

Материалы и методы исследований

В данной работе использованы продукты пиролиза лузги семян подсолнечника (КЛ-21), получение и вещественный состав которых указан в наших предыдущих работах [10]. Для исследования поведения продуктов пиролиза лузги семян подсолнечника при нагревании проведен термический анализ, включающийся в себя термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию с использованием совмещенного ТГ-ДСК-анализатора “ZCT-B” (Китай), при следующих условиях: корундовый тигель, масса навески 0,5 мг, воздушная и инертная (аргон) атмосферы, режим нагрева: комнатная температура – 1000 °C со скоростью 10°C/мин, скорость потока газа 100 мл/мин. Выбранные условия пиролиза и параметры термогравиметрического анализа соответствуют современным подходам к изучению лигноцеллюлозной биомассы [11; 12]. Адсорбционные испытания проводили с использованием сырой нефти (месторождение Ямала) и авиационного керосина марки ТС-1 в качестве адсорбата. Исследование адсорбции нефтепродуктов проводили по ГОСТу № 33627-2015 – межгосударственный стандарт “Уголь активированный. Стандартный метод определения сорбционных характеристик адсорбентов”, метод включающий динамическую адсорбцию воды (определение гидрофобности), динамическую адсорбцию воды в присутствии нефтепродукта, ускоренное и продолжительное испытание на адсорбцию нефтепродуктов. Динамическое испытание на адсорбируемость воды проводили в следующих условиях: пробу адсорбента массой $(5,2413 \pm 0,0001)$ г помещали в колбу объемом 200 мл, наполненную 100 мл дистиллированной воды. Колбу встряхивали руками в течение 15 минут при температуре (23 ± 4) °C, после чего выдерживали 2 минуты и визуально оценивали объем материала, погрузившегося на дно материала. Проба считалась выдержавшей испытание, если на дно погрузилось менее 10 об. % адсорбента. После визуальной оценки содержимое колбы фильтровали и через (30 ± 3) секунд взвешивали насыщенный водой адсорбент. Долю адсорбированной воды вычисляли по формуле:

$$\text{Адсорбируемость воды} = \frac{S_w}{S_0},$$

где:

$S_w = (S_{WT} - S_0)$ – масса адсорбированной воды; S_0 – масса первоначальной пробы адсорбента, взятой для испытания; S_{WT} – масса пробы адсорбента после обработки водой при проведении испытания на адсорбцию.

Динамическую адсорбцию воды в присутствии нефтепродукта определяли в следующих условиях: в колбу на 200 мл с 100 мл дистиллированной воды добавляли 3 мл сырой нефти (вязкостью ~300 сП). В эту среду помещали пробу адсорбента. Колбу плотно закрывали и встряхивали рукой 15 минут. Спустя 2 минуты отстаивания образцы подвергали визуальному контролю: объём погрузившегося адсорбента, состояние водной и нефтяной фаз, толщину и цвет нефтяной пленки.

Методика ускоренного и продолжительного испытания на адсорбцию нефтепродуктов: пробу адсорбента помещали в сетчатую корзинку (в данном эксперименте использовали сито с размером ячеек 37 мкм и погружали в ёмкость с керосином. Время контакта составляло 15 минут для ускоренного испытания и 24 часа для продолжительного. После извлечения пробы давали стечь в течение 30 секунд, после чего сразу взвешивали на аналитических весах. Нефтеёмкость (г нефтепродукта/г адсорбента) вычисляли по формуле:

$$\text{Адсорбируемость нефтепродукта} = \frac{S_s}{S_0},$$

где:

$S_s = (S_{ST} - S_0)$ – масса адсорбированного нефтепродукта; S_0 – масса первоначальной пробы адсорбента, взятой для испытания (сухой); S_{ST} – масса пробы адсорбента после обработки нефтепродуктом при проведении ускоренного или продолжительного испытания на адсорбцию нефтепродуктов.

Особую актуальность имеет разработка эффективных и безопасных адсорбционно-активных материалов приобретает в свете таких экологических катастроф, как: разлив дизельного топлива в мае 2020 года в районе Кайеркан города Норильска, разлив мазута в Керченском проливе декабре 2024 года и разлив нефти в марте 2026 года в Персидском заливе. В подобных ситуациях критически важным становится не только оперативное извлечение загрязнителя, но и безопасное обращение с насыщенным сорбентом. Собранный материал часто направляют на захоронение, при этом содержащиеся в нем легколетучие углеводородные фракции могут выделяться в атмосферу, создавая риск возгораний и вторичного загрязнения. В связи с этим оценка десорбционных характеристик необходима для прогнозирования безопасных условий транспортировки отработанного сорбента [13], а также для оценки рисков вторичного загрязнения [14]. Методика эксперимента: пробу адсорбента, предварительно насыщенную керосином в соответствии с методикой ускоренного испытания на адсорбцию нефтепродуктов поместили в открытую стеклянную кювету. Экспозицию проводили при комнатной температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$. Массу пробы фиксировали через 0.5, 1, 1.5 и 48 часов. Долю оставшегося керосина вычисляли по формуле:

$$\text{Доля оставшегося керосина} = \frac{m_t - m_0}{m_n - m_0} \cdot 100\%,$$

где:

m_t – масса образца в момент времени t , г; m_0 – начальная масса насыщенного образца, г; m_n – масса сухого адсорбента, г.

Результаты и обсуждения

С целью определения фазообразования и процессов при пиролизе лузги семян подсолнечника проведен термический анализ в воздушно-окислительной (рис. 1) и инертной атмосфере аргона (рис. 2).

В результате термического анализа лузги семян подсолнечника в воздушной атмосфере получены графические зависимости изменения массы образца и теплового потока от температуры. Анализ приведенных зависимостей позволяет выделить несколько характерных стадий термоокислительной деструкции. Первая стадия – дегидратация, в интервале температур от 27°C до 248°C наблюдается потеря массы – 3%, связанная с испарением свободной и адсорбционной влаги. Первая стадия – дегидратация, в интервале температур от 27°C до 248°C наблюдается потеря массы – 3%, связанная с испарением свободной и адсорбционной влаги.

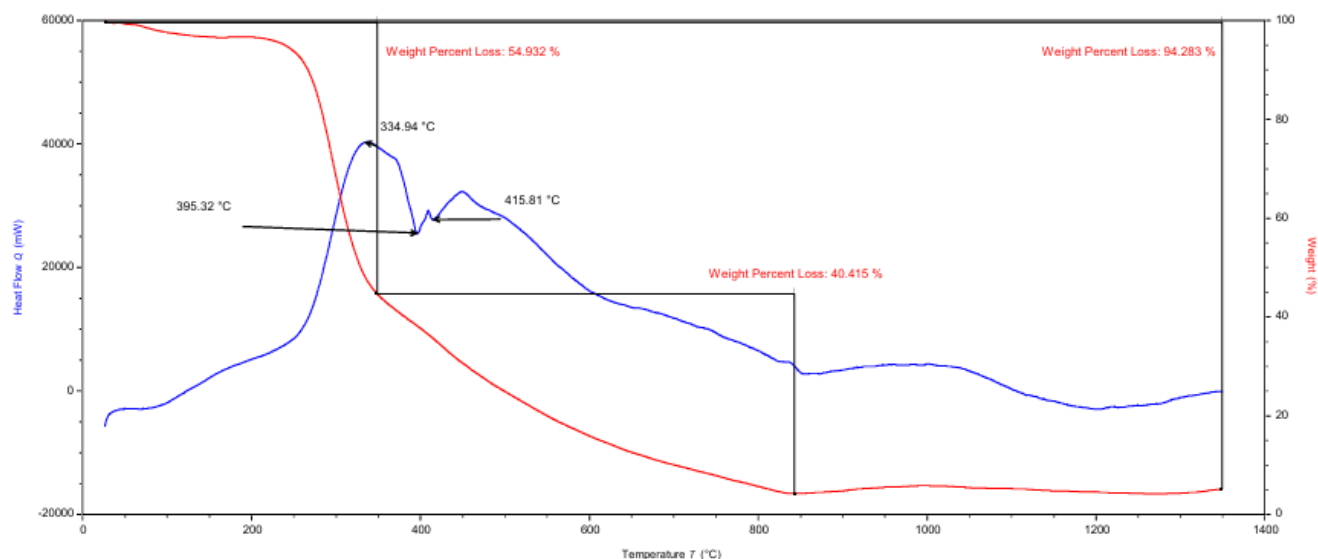


Рис. 1. Комплексная термограмма лузги семян подсолнечника в воздушной среде.
Fig. 1. Complex thermogram of sunflower seed husk in the air.

Вторая стадия термодеструкции обусловлена выходом и окислением летучих органических веществ. Указанная стадия сопровождается интенсивной потерей массы – 54,6% и происходит в интервале температур от 248°C до 334°C. Данная стадия характеризуется ярко выраженной ступенью на термогравиметрической кривой, что свидетельствует о интенсивном выделении и последующем термоокислении легколетучих органических полупродуктов разложения соединений биомассы (температура разложения целлюлозы $\approx$ 260°C, гемицеллюлозы $\approx$ 200 °C). Третья стадия – выгорание углеродного остатка в интервале температур от 334°C до 820°C потеря массы на данном этапе – 37,3%.

На кривой ДСК в интервале температур от 248°C до 600°C зафиксировано три основных тепловых эффекта. Первый экзотермический пик при температуре 334°C, обусловлен окислением органического материала в окислительной воздушной среде. Эндотермический эффект зафиксирован при температуре 398°C, что свидетельствует о деполимеризации органической матрицы. Третий экзотермический пик при температуре 410°C, обусловлен выделением и частичным окислением органических летучих веществ. Четвёртый экзотермический эффект при температуре 449°C характеризуется максимальной скоростью окисления углеродного остатка. На основании проведенного эксперимента установлено, что масса продуктов деструкции лузги семян подсолнечника в воздушной окислительной среде составляет 5,1% от исходной массы лузги семян подсолнечника.

С целью увеличения выхода массы продукта термодеструкции лузги семян подсолнечника проведен их нагрев в инертной (аргоновой) среде. В результате термического анализа образца лузги семян подсолнечника в инертной атмосфере аргона получены графические зависимости массы и теплового потока от температуры, представленные на рис. 2.

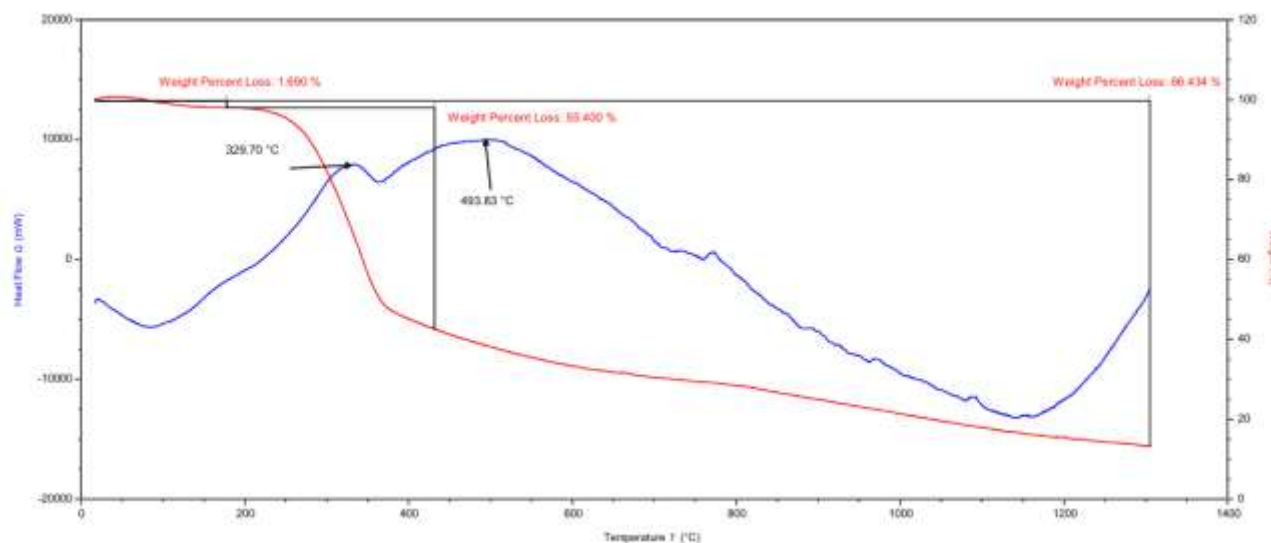


Рис. 2. Комплексная термограмма лузги семян подсолнечника в атмосфере аргона.
Fig. 2. Complex thermogram of sunflower seed husk in argon atmosphere.

Анализ приведённых графических зависимостей позволяет выделить несколько характерных стадий термической деструкции лузги семян подсолнечника в условиях пиролиза. Первая стадия – дегидратация, зафиксированная в интервале температур от 21°C до 254°C, сопровождается потерей 1.69% массы, обусловлена испарением свободной и адсорбционной влаги из образца. Вторая стадия происходит в интервале температур от 254°C до 361°C и обусловлена пиролизом лузги семян подсолнечника и объясняется термическом разложении основных биополимеров (гемицеллюлозы, целлюлозы и частично лигнина) с выделением летучих органических соединений, потеря массы на данном этапе – 55,4%. Третья стадия заключается в медленной карбонизации лузги семян подсолнечника, и осуществляется в интервале температур от 361°C до 820 °C. На термогравиметрической кривой наблюдается плавная потеря массы – 29,71%, связанная с выделением остаточных органических веществ. Указанный процесс сопровождается упорядочиванием углеродного скелета и превращением материала в твердый углеродистый остаток. Это подтверждается ранними работами по определению вещественного состава продуктов пиролиза лузги семян подсолнечника, в частности рентгенофазовым анализом и сканирующей электронной микроскопией [15].

Кривая ДСК начинается с эндотермического эффекта при температуре 46°C, связанного с испарением свободной воды. На кривой ДСК лузги подсолнечника наблюдаются три ярковыраженных тепловых эффекта. Первый экзотермический холмообразный эффект при температуре 329°C соответствует стадии поликонденсации лигнина с образованием углеродного остатка. Эндотермический эффект при 362°C обусловлен деструкцией термостабильных органических фрагментов. Второй экзотермический эффект при температуре 475 °C связан с вторичной карбонизацией - структурной перестройкой аморфного углерода в более упорядоченные формы. Конечный неразложившийся остаток (кокс + зола) составляет 13,2% от исходной массы образца. Что в 2,5 раз больше, чем при нагреве в воздушно-окислительной среде.

Крайне важным в хранении или транспортировке нефтепродуктов является безопасное обращение с отработанными адсорбентами. Адсорбционный материал должен проявлять термическую стабильность, исключая риск возгорания. Оценка термических характеристик карбонизата лузги семян подсолнечника приведена на рис. 3.

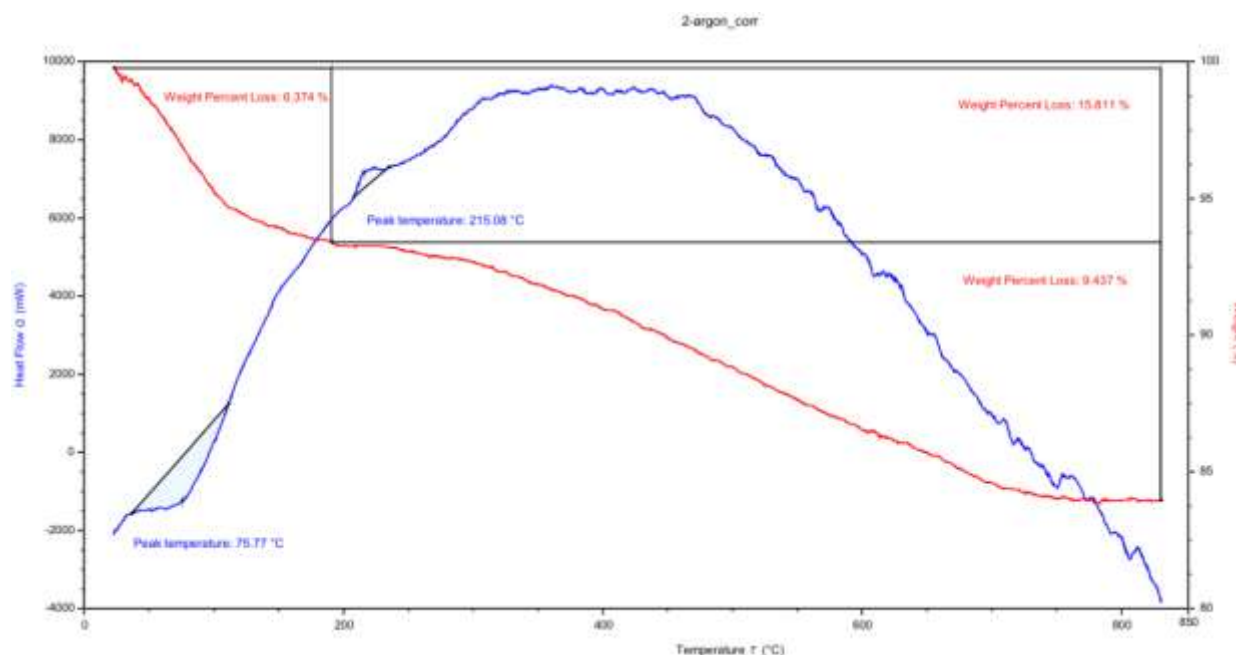


Рис. 3. Комплексная термограмма продуктов пиролиза лузги семян подсолнечника.
Fig. 3. Complex thermogram of sunflower seed husk pyrolysis products.

Термогравиметрическая кривая продуктов пиролиза лузги семян подсолнечника демонстрирует высокую термическую стабильность исследуемого образца. Общая потеря массы в диапазоне от комнатной температуры до 850°C составляет 15,81%, что является характерным для продуктов пиролиза органического сырья. Первая стадия характеризуется дегидратацией в интервале температур от 32°C до 111°C. Потеря массы на данном этапе составляет 6,3%, что свидетельствует о гигроскопичности материала. В интервале температур от 111°C до 820°C зафиксирована вторая стадия, которая характеризуется плавной потерей массы на всем протяжении температурного диапазона, без резких ступеней разложения, до 11,2%. Это указывает на завершенность основных процессов пиролиза в ходе получения продуктов пиролиза. Стабильность материала при хранении и эксплуатации согласуется с данными по термической стабильности биоуглей, полученных в аналогичных условиях [16].

На кривой ДСК в области 76 °C наблюдается слабый эндотермический эффект, сопровождающийся незначительной (0,5%) потерей массы, на термогравиметрической кривой, что позволяет интерпретировать его как процесс десорбции физически адсорбированной влаги с поверхности продукта пиролиза. Отсутствие на кривых ТГ-ДСК выраженных термических эффектов в диапазоне температур от 32°C до 850°C подтверждает завершенность процессов пиролиза и стабильность материала при хранении и эксплуатации.

В результате проведения динамического испытания на адсорбируемость воды зафиксировано, что большая часть адсорбента осталась на поверхности воды, а на дно погрузилось менее 10% его объема, что соответствует критериям ГОСТа. Расчетное значение адсорбируемости воды на адсорбенте составило: 9,24 г/г.

В исследовании динамической адсорбции воды в присутствии нефтепродукта после встряхивания и отстаивания толщина нефтяной пленки уменьшилась с 5 мм до 1 мм, а плёнка стала прозрачной. Это указывает на то, что адсорбент активно поглощает нефтепродукт, находясь в водной среде, демонстрируя селективность.

На основе экспериментальных данных по десорбции керосина в атмосферу воздуха построена графическая зависимость десорбции керосина от продолжительности эксперимента (рис. 4).

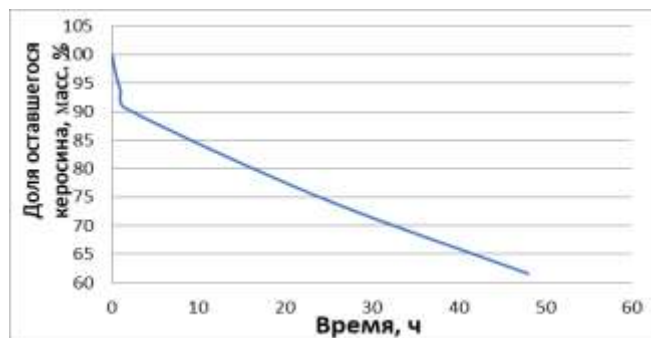


Рис. 4. Графическая зависимость десорбции керосина из продуктов пиролиза лузги семян подсолнечника с течением времени.

Fig. 4. Graphical dependence of kerosene desorption from sunflower seed husk pyrolysis products over time.

Анализ кривой показал, что за первые 1.5 часа система теряет около 9,3 масс. % поглощенного керосина. Интенсивная десорбция керосина за короткий промежуток времени объясняется тем, что десорбция керосина происходит с поверхности адсорбента или из крупных пор. В дальнейшем процесс десорбции замедляется. Между 1.5 и 48 часами десорбировалось 29,1 масс.% керосина, что указывает на низкую скорость десорбции на данном этапе. Предположительно это керосин, который находится в мезо- и микропорах порошков и удерживается гораздо сильнее. Полученные данные о двухстадийном характере десорбции имеют важное практическое значение для разработки режимов регенерации адсорбента.

На основе экспериментальных данных термогравиметрического анализа установлены основные стадии термической деструкции лузги семян подсолнечника в воздушной и инертной (аргоновой) средах. Сводные данные по температурным интервалам, потерям массы и характеру процессов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные стадии термической деструкции лузги подсолнечника в разных средах.

Table 1

The main stages of thermal destruction of sunflower hulls in different environments.

Среда	Стадия	Температурный интервал, °C	Потеря массы, %	Твёрдый остаток
Воздушная	1	27–248	3,0	5,1
	2	248–334	54,6	
	3	334–820	37,3	
Инертная (аргон)	1	21–254	1,69	13,2
	2	254–361	55,4	
	3	361–820	29,71	

В отличие от окислительной среды, где термодеструкция лузги подсолнечника протекает по механизму термоокисления с экзотермическим окислением органической матрицы и минимальным остатком (5,1 масс %), в инертной атмосфере аргона реализуется пиролиз, характеризующийся эндотермической деполимеризацией, вторичной карбонизацией с образованием углеродного каркаса. Различия в тепловых эффектах и температурах образцов анализируемых в воздушной и инертной (аргон) среде обусловлены отсутствием кислорода в инертной среде, что исключает окислительные реакции и способствует сохранению углеродного скелета в карбонизате лузги семян подсолнечника.

На основе экспериментальных данных по исследованию адсорбции нефти продуктами пиролиза лузги семян подсолнечника получены результаты, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Адсорбируемость нефтепродуктов карбонизатом лузги семян подсолнечника.

Table 2

Adsorption of petroleum products by sunflower seed husk carbonate.

Адсорбент	Адсорбат	Вид методики определения адсорбции	Адсорбируемость нефтепродуктов,
Карбонизат лузги семян подсолнечника	Сырая нефть месторождения Ямала	Ускоренная	1,65
		Продолжительная	1,84
Карбонизат лузги семян подсолнечника	Керосин авиационный марки ТС-1	Ускоренная	0,998
		Продолжительная	1,11

Адсорбируемость сырой нефти по ускоренной методике составила 1,65 г/г, по продолжительной - 1,84 г/г; для керосина эти значения равны 0,998 и 1,11 г/г соответственно. Полученные данные свидетельствуют о высокой нефтеёмкости материала. Адсорбент способен поглотить массу нефтепродукта, превышающую свою собственную. Результаты ускоренного и продолжительного испытаний достаточно близки, что говорит о быстрой кинетике адсорбции. Экспериментальный карбонизат по нефтеёмкости сопоставим с рядом известных адсорбентов из растительного сырья. По данным[17] нефтепоглощение измельченного бурого угля составляет 1-2 г/г, древесных опилок – 1,7 г/г, гидролизного лигнина – 1,5-3,0 г/г, лузга гречки – 2,3 г/г, продукты пиролиза коры лиственницы сибирской – 6,8 г/г[18]. Однако в более поздних работах показано, что активированные биоугли из коры и лузги могут достигать значений 4-6 г/г [19, 20]. Сравнительный анализ с известными сорбентами из растительного сырья приведён на рис. 5.

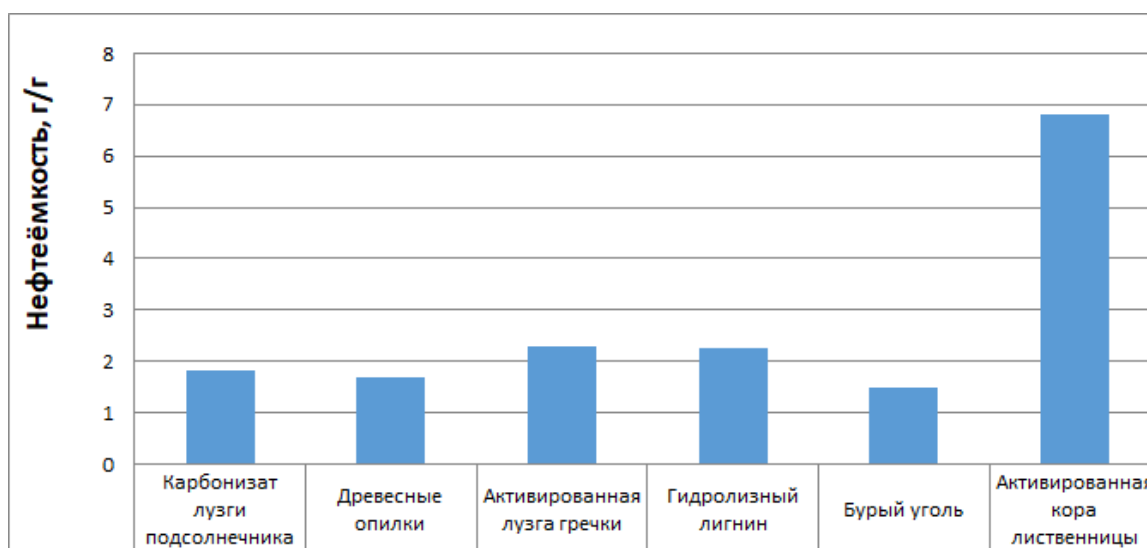


Рис. 5. Сравнительная диаграмма экспериментального карбонизата с известными материалами для адсорбции нефтепродуктов.

Fig. 5. Comparative diagram of experimental carbonizate with known materials for oil product adsorption.

Таким образом, использование неактивированного карбонизата, полученного пиролизом лузги, является экономически оправданным. Исключение стадии дополнительной активации позволяет сократить себестоимость адсорбента при сохранении конкурентоспособной нефтеёмкости.

Выводы

Установлены физико-химические параметры процесса термоокисления лузги семян подсолнечника в окислительной (воздушной) среде. Зафиксирована стадия дегидратации в интервале температур от 27°C до 248°C с потерей массы – 3%. В интервале температур от 248°C до 334°C выявлена потеря массы – 54,6% и установлено, что в данном температурном диапазоне происходит выделение и последующее термоокисление легколетучих органических полупродуктов разложения соединений биомассы. Зафиксировано выгорание углеродного остатка в интервале температур от 334°C до 820°C с потерей массы 37,3%. Установлен

конечный выход твердого углеродного остатка – 5,1 масс.%. Выявлены основные параметры пиролиза лузги семян подсолнечника в инертной среде. Зафиксирована стадия дегидратации в интервале температур от 21°C до 254°C с потерей массы - 1.69%. В интервале температур от 254°C до 361°C выявлена потеря массы – 55,4%. Зафиксирована карбонизация лузги семян подсолнечника в интервале температур от 361°C до 820°C и установлен конечный выход твердого углеродного остатка 13,2 масс. %.

Установлена высокая термическая стабильность продукта пиролиза лузги семян подсолнечника. Зафиксирована стадия дегидратации в интервале температур от 32°C до 111°C с потерей массы 6,3 %. Установлена общая потеря массы в интервале температур от 32°C до 850°C – 11,2 масс.%, что характерно для продуктов пиролиза органического сырья. Отсутствие резких ступеней на термогравиметрической кривой свидетельствует о завершенности основных процессов пиролиза.

Зафиксирована нефтеёмкость материала по отношению к сырой нефти и керосину. Для сырой нефти адсорбционная способность составила 1,65 г/г (ускоренная методика) и 1,84 г/г (продолжительная методика), для керосина – 0,998 г/г и 1,11 г/г соответственно.

Выявлена селективность действия адсорбента в условиях водной среды. В эксперименте с добавлением нефтепродукта визуально наблюдалось активное поглощение нефти адсорбентом, что выразилось в уменьшении толщины и осветлении нефтяной пленки в результате эксперимента.

Установлен двухстадийный характер десорбции керосина как летучих ингредиентов нефти из пор адсорбента: интенсивная десорбция с поверхности из крупных пор адсорбента происходит в первые 1,5 часа (потеря 9,3 масс. % адсорбата) с последующим значительным замедлением процесса, связанным с удержанием керосина в мезо- и микропорах.

Полученные результаты позволяют рекомендовать карбонизат лузги семян подсолнечника в качестве эффективного и экономически доступного адсорбента для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов.

Список источников

1. Махотлова М.Ш., Темботов Т.М. Влияние нефтяных загрязнений на окружающую среду // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 3 (45). С. 105 – 107. DOI:10.18454/IRJ.2016.45.085
2. Ковехова А.В., Земнухова Л.А., Арефьев О.Д. Неорганические компоненты плодовых оболочек подсолнечника // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 3. С. 8 – 18. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-3-9-18
3. Рузянова А.А., Темникова О.Е. Новые способы использования отходов масложирового производства // Международные научно-практические конференции. Москва, 2018. С. 210 – 214.
4. Ахмедзянова Р.Р., Тунцев Д.В., Валеева Р.Т. Отходы подсолнечника – экономически перспективные виды сырья для производства биотехнологических продуктов / Технологический университет. Казань, 2022. С. 10 – 11.
5. Кудрявцева О.П., Бальчугова А.Е., Схведиани Ю.А., Смятская Т.Ю. Технологическая и аппаратурная схема переработки отходов масложировой промышленности для производства нефтесорбентов // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 3. С. 4 – 10. DOI 10.18412/1816-0395-2024-3-4-10
6. Zhang Y., Li H., Liu Y. et al. Adsorption of crude oil by biochar derived from sunflower seed husk: kinetic and thermodynamic study // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10. Iss. 3. P. 107654. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107654. (Scopus, Q1).
7. Wang S., Zhu Y., Xu X. et al. Pyrolysis of sunflower husk for production of porous carbon and its application in oil spill cleanup // Biomass and Bioenergy. 2023. Vol. 168. P. 106675. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106675. (Scopus, Q1).
8. Kumar A., Singh R., Srivastava V. Sunflower husk-derived activated carbon for efficient removal of diesel oil from aqueous solutions // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. Iss. 5. P. 7200 – 7215. DOI: 10.1007/s11356-023-31587-3. (Scopus, Q2).
9. Зубкова О.С., Торопчина М.А., Чихачева А.В., Кудинова А.А. Получение гранулированного сорбента на основе активного угля для очистки нефтезагрязнённых сточных вод // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2022. № 4 (216). С. 77 – 84. DOI 10.17213/1560-3644-2022-4-77-84
10. Раздобарин А.Е., Везенцев А.И., Труфанов Д.А., Соколовский П.В. Вещественный состав и адсорбционные характеристики продуктов пиролиза лузги семян подсолнечника // Innovations in life sciences: Сборник материалов V Международного симпозиума. Белгород. 2023. С. 375 – 376.

11. Chen H., Zhao Y., Li P. Thermal degradation and carbonization of lignocellulosic biomass: TG-FTIR analysis of sunflower husk // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 189. P. 1152 – 1164. DOI: 10.1016/j.renene.2022.03.075. (Scopus, Q1).
12. Liang X., Zhang Q., Liu H. One-step pyrolysis without activation for obtaining efficient oil adsorbents from sunflower husk // *Industrial Crops and Products*. 2025. Vol. 195. P. 116724. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116724. (Scopus, Q1).
13. Lee J., Park S., Kim Y. Desorption behavior of light hydrocarbons from spent carbon sorbents: implications for safe disposal // *Journal of Hazardous Materials*. 2024. Vol. 462. P. 132785. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132785. (Scopus, Q1).
14. Petrova N., Ivanov A., Smirnova T. Low-cost carbon sorbents from agricultural waste for oil spill remediation: a review // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 395. P. 136402. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136402. (Scopus, Q1).
15. Веприкова Е.В., Терещенко Е.А., Чесноков Н.В. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2010. Т. 3. № 3. С. 285 – 304. DOI:10.17516/1998-2836-2010-3-3-285-304
16. Gao J., Wu F., Chen M. et al. Surface modification of biochar from sunflower husk for enhanced sorption of petroleum hydrocarbons // *Chemical Engineering Journal*. 2025. Vol. 485. P. 149876. DOI: 10.1016/j.cej.2025.149876. (Scopus, Q1).
17. Рудковский А.В., Фетисова О.Ю., Чесноков Н.В. Сорбция нефтепродуктов углеродными сорбентами из коры лиственницы сибирской // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2016. Т. 9. № 1. С. 109 – 118. DOI:10.17516/1998-2836-2016-9-1-109-118
18. Везенцев А.И., Раздобарин А.Е., Япрынцев М.Н., Соколовский П.В., Труфанов Д.С. Фазовый состав и структурно-морфологические характеристики продуктов пиролиза растениеводческих и коммунальных отходов // *Вестник Технологического университета*. 2024. Т. 27. № 2. С. 71 – 76. DOI:10.55421/1998-7072_2024_27_2_71
19. Radi M., Szabo L., Toth J. Comparative study on oil sorption capacity of biochars from different agricultural residues // *Environmental Technology*. 2023. Vol. 44. Iss. 20. P. 2985 – 2998. DOI: 10.1080/09593330.2022.2055623. (Scopus, Q2).
20. Mousa S., Abbas H., El-Ghaffar M. Adsorptive removal of kerosene from water using pyrolyzed sunflower hulls: equilibrium and kinetic modeling // *Desalination and Water Treatment*. 2024. Vol. 317. P. 100262. DOI: 10.5004/dwt.2024.30182. (Scopus, Q3).

References

1. Makhotlova M.Sh., Tembotov T.M. Impact of oil pollution on the environment. *International research journal*. 2016. No. 3 (45). P. 105 – 107. DOI: 10.18454/IRJ.2016.45.085
2. Kovekhova A.V., Zemnukhova L.A., Arefyev O.D. Inorganic components of sunflower fruit skins. *News of universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2017. Vol. 7. No. 3. P. 8 – 18. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-3-9-18
3. Ruzyanova A.A., Temnikova O.E. New methods of using waste from oil and fat production. *International scientific and practical conferences*. Moscow, 2018. P. 210 – 214.
4. Akhmedzyanova R.R., Tuntsev D.V., Valeeva R.T. Sunflower waste – economically promising types of raw materials for the production of biotechnological products. *Technological University. Kazan*, 2022. P. 10 – 11.
5. Kudryavtseva O.P., Balchugova A.E., Skhvediani Yu.A., Smyatskaya T.Yu. Technological and hardware scheme for processing waste from the oil and fat industry for the production of oil sorbents. *Ecology and Industry of Russia*. 2024. T. 28. No. 3. P. 4 – 10. DOI 10.18412/1816-0395-2024-3-4-10
6. Zhang Y., Li H., Liu Y. et al. Adsorption of crude oil by biochar derived from sunflower seed husk: kinetic and thermodynamic study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 3. P. 107654. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107654. (Scopus, Q1).
7. Wang S., Zhu Y., Xu X. et al. Pyrolysis of sunflower husk for production of porous carbon and its application in oil spill cleanup. *Biomass and Bioenergy*. 2023. Vol. 168. P. 106675. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106675. (Scopus, Q1).
8. Kumar A., Singh R., Srivastava V. Sunflower husk-derived activated carbon for efficient removal of diesel oil from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31. Iss. 5. P. 7200 – 7215. DOI: 10.1007/s11356-023-31587-3. (Scopus, Q2).

9. Zubkova O.S., Toropchina M.A., Chikhacheva A.V., Kudinova A.A. Production of granulated sorbent based on activated carbon for purification of oil-contaminated wastewater. News of higher educational institutions. North Caucasus region. Engineering sciences. 2022. No. 4 (216). P. 77 – 84. DOI 10.17213/1560-3644-2022-4-77-84
10. Razdobarin A.E., Vezentsev A.I., Trufanov D.A., Sokolovsky P.V. Material composition and adsorption characteristics of sunflower seed husk pyrolysis products. Innovations in life sciences: Proceedings of the V International Symposium. Belgorod. 2023. P. 375 – 376.
11. Chen H., Zhao Y., Li P. Thermal degradation and carbonization of lignocellulosic biomass: TG-FTIR analysis of sunflower husk. Renewable Energy. 2022. Vol. 189. P. 1152 – 1164. DOI: 10.1016/j.renene.2022.03.075. (Scopus, Q1).
12. Liang X., Zhang Q., Liu H. One-step pyrolysis without activation for obtaining efficient oil adsorbents from sunflower husk. Industrial Crops and Products. 2025. Vol. 195. P. 116724. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116724. (Scopus, Q1).
13. Lee J., Park S., Kim Y. Desorption behavior of light hydrocarbons from spent carbon sorbents: implications for safe disposal. Journal of Hazardous Materials. 2024. Vol. 462. P. 132785. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132785. (Scopus, Q1).
14. Petrova N., Ivanov A., Smirnova T. Low-cost carbon sorbents from agricultural waste for oil spill remediation: a review. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 395. P. 136402. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136402. (Scopus, Q1).
15. Veprikova E.V., Tereshchenko E.A., Chesnokov N.V. Features of water purification from oil products using oil sorbents, filter materials, and activated carbons. Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry. 2010. Vol. 3. No. 3. Pp. 285–304. DOI:10.17516/1998-2836-2010-3-3-285-304
16. Gao J., Wu F., Chen M. et al. Surface modification of biochar from sunflower husk for enhanced sorption of petroleum hydrocarbons. Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 485. P. 149876. DOI: 10.1016/j.cej.2025.149876. (Scopus, Q1).
17. Rudkovsky A.V., Fetisova O.Yu., Chesnokov N.V. Sorption of petroleum products by carbon sorbents from Siberian larch bark. Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry. 2016. Vol. 9. No. 1. P. 109 – 118. DOI:10.17516/1998-2836-2016-9-1-109-118
18. Vezentsev A.I., Razdobarin A.E., Yapryntsev M.N., Sokolovsky P.V., Trufanov D.S. Phase composition and structural and morphological characteristics of pyrolysis products of plant and municipal waste. Bulletin of the Technological University. 2024. T. 27. No. 2. P. 71 – 76. DOI:10.55421/1998-7072_2024_27_2_71
19. Radi M., Szabo L., Toth J. Comparative study on oil sorption capacity of biochars from different agricultural residues. Environmental Technology. 2023. Vol. 44. Iss. 20. P. 2985 – 2998. DOI: 10.1080/09593330.2022.2055623. (Scopus, Q2).
20. Mousa S., Abbas H., El-Ghaffar M. Adsorptive removal of kerosene from water using pyrolyzed sunflower hulls: equilibrium and kinetic modeling. Desalination and Water Treatment. 2024. Vol. 317. P. 100262. DOI: 10.5004/dwt.2024.30182. (Scopus, Q3).

Информация об авторах

Везенцев А.И., доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, ул. Победы, 85, vesentsev@bsuedu.ru

Раздобарин А.Е., аспирант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, ул. Победы, 85, 1046335@bsuedu.ru

Труфанов Д.А., технолог, ООО “Исследователь КМА”, Белгородская обл., г. Старый Оскол, станция Котёл промузел, пл-ка Дорожная, проезд III-7, trufanovda@gmail.com

Кожухова Е.И., научный сотрудник, Курчатовский комплекс физико-химических технологий научно-исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, evgeshaparinarina@gmail.com

© Везенцев А.И., Раздобарин А.Е., Труфанов Д.А., Кожухова Е.И., 2026

Information about the authors

Vezentsev A.I., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor, Belgorod State National Research University, Belgorod, Pobedy Street, 85, vesentsev@bsuedu.ru

Razdobarin A.E., Postgraduate, Belgorod State National Research University, Belgorod, Pobedy Street, 85, 1046335@bsuedu.ru

Trufanov D.A., Technologist, Researcher, KMA Researcher LLC, Belgorod Region, Stary Oskol, Kotel Industrial Zone Station, Dorozhnaya Square, Sh-7 Drive, trufanovda@gmail.com

Kozhukhova E.I., Researcher, Kurchatov Complex of Physical and Chemical Technologies, Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, pl. Academician Kurchatov, Building 1, evgeshapanarina@gmail.com

© Vezentsev A.I., Razdobarin A.E., Trufanov D.A., Kozhukhova E.I., 2026