

УДК 911.9:504:581.6
DOI 10.17513/use.38229

ОЦЕНКА СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ОПАДА УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА ГОРОДА УФА)

Насырова Э.С., Кальсин Н.А., Кострюкова Н.В., Султанова Д.С.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, e-mail: kalsin.nikita@bk.ru

Аннотация. В настоящее время проблема утилизации опавших листьев в пределах урбанизированных территорий городов приобретает особую актуальность, так как они становятся растительными отходами, которые приравниваются к твердым коммунальным отходам и нуждаются в вывозе на полигоны. Однако при переходе мирового сообщества на экономику замкнутого цикла опавшие листья следует рассматривать как ценный материал. В настоящее время существуют методы использования (переработки) опавших листьев с извлечением их полезных свойств. К основным способам переработки опавшей листвы относят: создание компоста; экстракцию полезных соединений; производство биотоплива в форме пеллет, а также получение биогаза; сорбцию различных загрязняющих веществ из водной среды; производство пластмасс и бумажных изделий. Эти способы рассматриваются как отечественными, так и зарубежными исследователями. В данной работе рассмотрен способ использования опавших листьев урбанизированной территории в качестве нефтесорбента для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Объект исследования – опавшие листья *Quercus robur*, собранные осенью 2022 г. в парковой зоне г. Уфа (Россия). По методике ГОСТ 33627-2015 исследованы сорбционные свойства опавших листьев *Quercus robur* как адсорбента II типа. Анализ плавучести показал высокую плавучесть образцов – более 72 ч. Нефтеемкость листьев *Quercus robur* составила 4,67–5,91 г/г, что сопоставимо с нефтеемкостью сорбентов, присутствующих на рынке.

Ключевые слова: экономика замкнутого цикла, урбанизированная территория, опавшая листва, растительные отходы, *Quercus robur*, нефтеемкость

ASSESSMENT OF URBANIZED AREA LEAF LITTER SORPTION PROPERTIES (ON THE EXAMPLE OF THE UFA CITY CENTRAL DISTRICT)

Nasyrova E.S., Kalsin N.A., Kostryukova N.V., Sultanova D.S.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, e-mail: kalsin.nikita@bk.ru

Annotation. Currently, the problem of fallen leaves recycling within urban areas of cities is becoming particularly relevant, as they become plant waste, which is equated to solid municipal waste and needs to be exported to landfills. However, as the global community transitions to a circular economy, fallen leaves should be considered as a valuable material. Currently, there are methods of utilizing (recycling) fallen leaves with the extraction of their beneficial properties. The main methods of processing fallen leaves include composting; useful compounds extraction; production of biofuel in the form of pellets, as well as biogas production; sorption of various pollutants from the aquatic environment; plastics and paper products production. These methods are considered by both domestic and foreign researchers. This paper considers the method of using fallen leaves from an urbanized territory as an oil sorbent to eliminate emergency oil and petroleum products spills. The object of the study is the fallen leaves of *Quercus robur*, collected in the autumn of 2022 in the park area of Ufa (Russia). The sorption properties fallen leaves of *Quercus robur* as a type II adsorbent were studied according to the GOST 33627-2015 method. The buoyancy analyzes showed high buoyancy of the samples, more than 72 hours. The *Quercus robur* leaves oil capacity was 4.67-5.91 g/g, which is comparable to the oil capacity of sorbents present on the market.

Keywords: circular economy, urbanized territory, fallen leaves, plant waste, *Quercus robur*, oil capacity

Биологический процесс роста деревьев сопровождается периодическим сбрасыванием листьев. Например, в умеренном климатическом поясе это происходит осенью. В связи с этим на урбанизированной территории опавшие листья становятся растительными отходами. Они приравниваются к твердым коммунальным отходам и вывозятся на полигоны. Однако в настоящее время существуют методы использования (переработки) опавших листьев с извлечением их полезных свойств. К основным способам переработки опавшей листвы относят: создание компоста; экстракцию полезных соединений; производство биотоплива в форме

пеллет, а также получение биогаза; сорбцию загрязняющих веществ; производство пластмасс и бумажных изделий. Эти способы рассматриваются как отечественными, так и зарубежными исследователями. Например, А.Д. Губанов и др. в своей работе [1] предлагают использовать листья в качестве гранулированного органоминерального удобрения путем добавления препаратов, способствующих быстрому разложению и насыщению почвы. Другие исследователи [2] получили биоуголь из опавших листьев *Jatropha curcas* L. Многие исследователи предлагают перерабатывать опавшие листья по технологии компостирования путем

равномерного перемешивания биомассы с различными веществами: минералосодержащими фильтрационными осадками сахарных заводов [3], пищевыми отходами [4] или свиным навозом [5].

Опавшая листва обладает хорошей теплопроводной способностью и может быть переработана в биотопливо второго поколения путем преобразования в топливные гранулы, брикеты, пеллеты [6, 7] или получения биогаза [8].

В последние годы для удаления примесей, содержащихся в воде, успешно применяются сорбционные материалы на основе растительных отходов. Например, в работе [9] рассмотрена сорбционная очистка модельных растворов от ионов железа путем применения опилок и опавшей листвы *Quercus robur*. Другие исследователи получили железодобавленный биоуголь для сорбции анионов [10]. Obaida Alhajali и др. [11] изучали возможность удаления нитратов и фосфатов из водной среды при помощи порошка из листьев *Pistacia lentiscus*, а Ali Q. Alorabi и др. [12] оценивали сорбционные способности *Lavandula pubescens* при удалении ионов свинца из сточных вод.

В рамках постепенного перехода мирового сообщества к экономике замкнутого цикла растет производство биопластика, включающего биоосновные полимеры (bio-based plastic) и биоразлагаемые (biodegradable plastic). Содержащийся в опавших листьях лигнин может использоваться как добавка к наполнителю для производства пластмасс. Например, в работе [13] методом математического планирования изучается возможность получения пластика на основе листьев финиковой пальмы. В работе А.С. Ершова [14] описываются исследования по применению отходов лесной растительности, а именно древесной растительности и опавшей листвы из участков лесопарковых зон для получения пластика методом горячего прессования.

Ежегодно вырубается более 100 млн деревьев для производства бумаги с связи с увеличением потребления бумажной про-

дукции с 92 до 208 млн т в год. Многие исследователи считают, что промышленное производство бумаги из опавшей листвы может существенно сократить вырубку лесов. Например, в работе [15] представлен метод получения целлюлозных волокон из опавших листьев с помощью химико-термической обработки.

Еще одним способом использования растительных отходов, таких как опавшая листва, отходы переработки трав, лузга подсолнечника, кукурузные початки, является получение нефтесорбента для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Целью данной работы является оценка сорбционных свойств листового опада урбанизированной территории. Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать основные свойства нефтесорбентов и методы определения этих свойств; изучить видовой состав лесных насаждений Уфы и выбрать объект исследования; в соответствии с выбранными методами изучить свойства объекта исследования как нефтесорбента.

Универсальный нефтесорбент должен обладать следующими свойствами и качествами: высокой сорбционной способностью к нефти и нефтепродуктам; обладать минимальным временем поглощения разлива; иметь возможность к регенерации; быть экологичным; обладать низкой способностью к водопоглощению; содержать высокопористую поверхность; а также легкость в технологическом изготовлении и утилизации. Классификация сорбентов приведена в табл. 1–3.

Свежие листья по своей природе очень скоропортящиеся. Для сохранения листьев на более длительный срок необходим соответствующий метод сушки для удаления влаги до безопасного уровня активности. Низкое содержание влаги в продуктах, приготовленных из высушенных листьев, помогает увеличить срок их хранения.

Для удаления необходимого количества воды из листьев используется контролируемый процесс термической обработки.

Таблица 1

Классификация нефтяных сорбентов по исходному сырью

Органические сорбенты				Неорганические сорбенты	
Органо-минеральные	Синтетические	Природного происхождения	Каустобиолиты	Искусственные минералы	Естественные минералы
Нефтьешламы Сланцы	Полиуретан Тефлон	Опилки Листва	Торф Уголь	Перлит Силикагель	Силикаты Цеолиты

Таблица 2

Классификация сорбентов по дисперсности

Дисперсные		Формованные		
Крупнодисперсные	Мелкодисперсные	Прессованные	Волокнистые	Комбинированные
Хлопья Крошка Гранулы	Порошки	Плиты	Тканые материалы	Подушки Сорбирующие боны

Таблица 3

Классификация сорбентов по плавучести

Неплавучие	Ограниченной плавучести	Высокой плавучести
До 3 ч	2–72 ч	Более 72 ч

Оптимизированный процесс сушки необходим не только для сохранения листьев и получения концентрированных питательных веществ, но и для минимизации энергопотребления, чтобы сделать его экологически чистым. Для обезвоживания различных листьев применяются многочисленные методы: воздушная сушка, сушка на солнце, сушка в прессе, сушка в печи горячим воз-

духом, сушка в микроволновой печи, сублимационная сушка, сушка силикагелем, сушка глицерином и конвективная сушка. Определение сорбционных характеристик проводится в соответствии с ГОСТ 33627-2015.

Материалы и методы исследования

Город Уфа является одним из зеленых городов России (рис. 1).

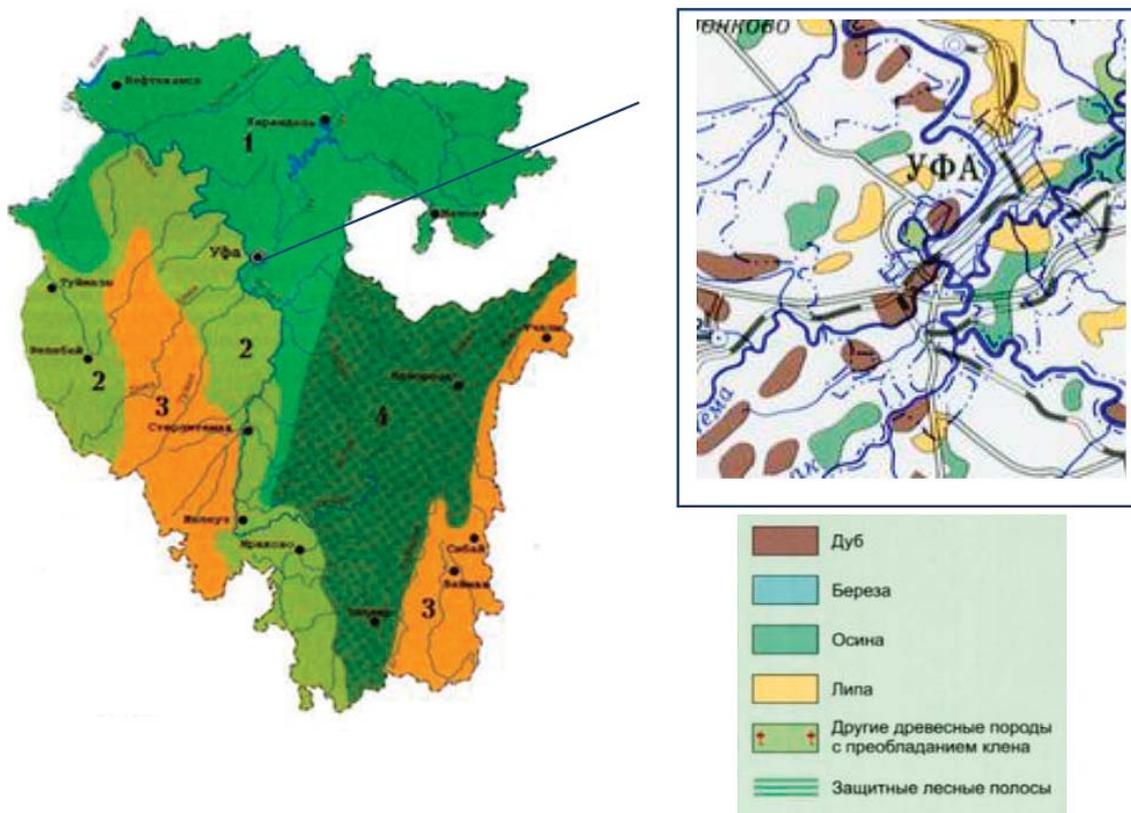


Рис. 1. Видовой состав лесных насаждений Уфы: 1 – хвойно-широколиственные леса; 2 – зона лесостепи; 3 – степная зона; 4 – горно-лесная зона

Естественные леса города – типичные широколиственные, представленные такими видами, как *Quercus robur*, *Tilia cordata*, *Populus tremula* и *Acer platanoides*.

Для исследования основных сорбционных характеристик опавшей листвы осенью 2022 г. собран лиственный опад *Quercus robur* в центральном районе Уфы на территории сквера 50-летия Победы (в средней части сквера). Листья собирались вручную в пластиковые мешки объемом 30 л без утрамбовывания, свободно. Сушка листьев проводилась естественным путем (воздушная сушка) в лаборатории кафедры безопасности производства и промышленной экологии Уфимского университета науки и технологий при температуре 22–23 °С, влажности 20–22 % на бумажной подстилке в течение месяца с периодическим перемешиванием. Воздушная сушка является наиболее традиционным методом сушки, занимает от двух до четырех недель, потому что для полного высыхания требуется больше времени по сравнению с другими методами.

Для получения фракционного состава использовался электрический измельчитель, лабораторные сита с размером ячеек от 0,1 до 10,0 мм и аналитические весы. Исследуемая масса листового опада *Quercus robur* взвешивалась по 50 г и измельчалась до однородной консистенции в течение 18 с.

Для определения плавучести навеска измельченного листового опада массой 1 г насыпалась в емкость, заполненную водой объемом 250 мл на 5 мин. После отстаивания опыт повторялся с перемешиванием и аналогичным отстаиванием.

Для определения водопоглощения навеска измельченного листового опада массой

1±0,0090 г помещалась в закрывающееся сито и погружалась в емкость с водой объемом 300 мл на 15 мин.

Для определения адсорбируемости воды по ГОСТ 33627-2015 навеска измельченного листового опада массой 1±0,0200 г помещалась в колбу, наполненную водой 250 мл, далее содержимое встряхивалось в течение 15 мин. После в течение 2 мин раствор отстаивался, и анализировался процент выпадения листьев в осадок.

Для определения нефтеемкости навеска измельченного листового опада массой 1±0,001 г насыпалась в сито, которое погружалось в емкость с нефтью на 10 мин. После этого нефти давали стечь на протяжении 2 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Дуб черешчатый (*Quercus robur*) – типовой вид рода Дуб (*Quercus*) семейства Буковые (*Fagaceae*) образует широколиственные леса (дубравы) на юге лесной и в лесостепной зонах. Широко распространен в Западной Европе и европейской части России, встречается на севере Африки и в Западной Азии. В листьях содержатся флавоноиды, пентозаны, дубильные вещества, кверцетин, а также красящие вещества. Во всех частях дуба имеются вещества дезинфицирующего и фитонцидного характера. Для описания листьев отобрано пять наилучших образцов (рис. 2).

Все образцы имеют одинаковый грязно-коричневый, бурый цвет, по мере уменьшения размеров область пятнистости становится меньше, первый и второй образец больше чем наполовину покрыты пятнами.



Рис. 2. Визуализация листьев *Quercus robur*

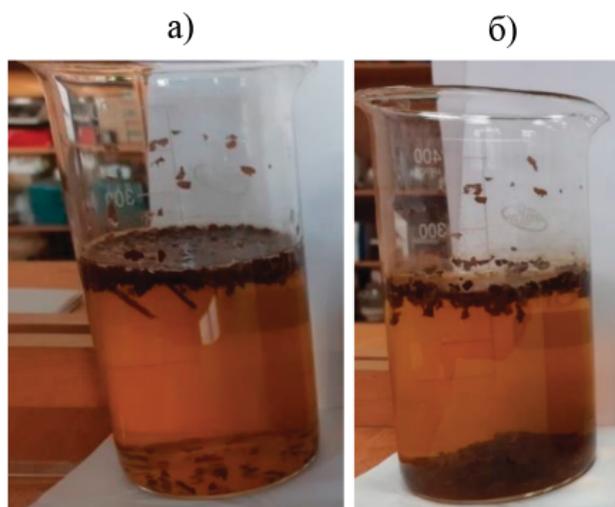


Рис. 3. Раствор листового опада *Quercus robur*:
а) сутки отстаивания; б) трое суток отстаивания

Длина листа дуба уменьшается от 13,5 до 6 см с шагом 1,0–2,5 см в порядке уменьшения длины; ширина также уменьшается от 8 до 4 см с величиной шага 0,5–1,5 см; длина черешка примерно одинаковая на каждый лист 0,5 см; количество жилок варьируется от 9 до 21 шт. У листьев дуба выделяется головная жилка, расположенная посередине, вокруг которой ветвятся мелкие, создавая сетку. Средняя длина листа – 10 см, ширина – 5,8 см, длина черешка – 0,46 см, масса листа – 1,2393 г.

Измельченная масса листового опада *Quercus robur* разделялась на 6 фракций: 10,0; 5,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Исходя из размеров фракций, выделены три группы частиц: крупные – 5,0–10,0 мм, средние – 1,0–2,0 мм и мелкие – 0,5–0,1 мм.

Исходя из классификации нефтесорбентов (табл. 1 и 2) опавшая листва является сорбентом природного происхождения (листва) и относится к крупнодисперсным частицам (хлопья). По методике ГОСТ 33627-2015 исследованы сорбционные свойства опавших листьев дуба черешчатого как адсорбента II типа.

По результатам исследований плавучести можно сделать вывод об отсутствии осадка после отстаивания и перемешивания опытных образцов на протяжении 5 мин мелкой и средней фракции; в осадке крупной фракции соответственно выпадают лишь черенки. Раствор листового опада *Quercus robur* после суток отстаивания приобрел окрас от золотисто-коричневого до чайного цвета (рис. 3).

В соответствии с табл. 3 листовой опад *Quercus robur* имеет высокую плавучесть. Влагоемкость оставила 3,6 г/г. Следует отметить, что в работе [16] проведена оценка водопоглощения коры дуба, которая составила 3,4 г/г и соизмерима с полученными в работе результатами.

Нефтеемкость дуба черешчатого в соответствии с полученными в работе результатами составила 4,67–5,91 г/г. Аналогичные результаты (4,77–5,06 г/г) получены исследователями из Казанского национального исследовательского технологического университета по коре дуба. Соответственно, сорбент из опавшей листвы может быть использован для ликвидации небольших разливов нефти и нефтепродуктов.

Заключение

Таким образом, растительные отходы, в частности опавшие листья, урбанизированной территории представляют собой ценный ресурс и могут быть использованы для различных целей – от получения удобрений до получения бумаги. Также при переходе мирового сообщества на экономику замкнутого цикла опавшие листья следует рассматривать как материал для получения биосорбента. На примере урбанизированной территории Уфы исследованы сорбционные характеристики опавшей листвы, а именно *Quercus robur*. Полученная нефтеемкость листьев дуба составила 4,67–5,91 г/г, что сопоставимо с нефтеемкостью сорбентов, присутствующих на рынке, например таких, как «Экограннефторф»

(не менее 4 г/г), «Нефлесорб» (4,6–9 г/г), «ЭКОПРОСОРБ» (5,5–6,6 г/г). При этом возможно повысить нефтеемкость получаемых биосорбентов путем модификации опавшей листвы разнообразными методами: гидротермальной и термообработкой, ацетилизацией, использованием растворов NaClO₂ и NaOH, стеарата кальция и жирных кислот.

Полученные в работе результаты будут интересны исследователям в области нефлесорбентов и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

Список литературы

1. Губанова А.Д., Костенко М.Ю., Костенко Н.А., Липин В.Д., Рембалович Г.К. Обоснование параметров технических средств для утилизации опавших листьев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2021. № 1 (49). С. 104–112.
2. Konaka T., Yabuta S., Mazereku C., Kawamitsu Y., Tsujimoto H., Ueno M., Akashi K. Use of carbonized fallen leaves of *Jatropha curcas* L. as a soil conditioner for acidic and undernourished soil // *Journals of Agronomy*. 2019. Vol. 9, Is. 5. P. 236–241. DOI: 10.3390/agronomy9050236.
3. Чериков С.Т., Черикова Д.С., Шамыралиев Ж.Д. Эколого-экономическая эффективность органоминерального удобрения из древесно-растительных отходов городского лесопаркового хозяйства // Вестник Бишкекского гуманитарного университета. 2015. № 2 (32). С. 233–235.
4. Meng L.F., Li J.Z., Qingbin Y., Nan H. Fallen leaves are superior to tree pruning as bulking agents in aerobic composting disposing kitchen waste // *Journal of Bioresource Technology*. 2022. Vol. 346. P. 257–261. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126374.
5. Cheng Y., Wan W. Strong linkage between nutrient-cycling functional gene diversity and ecosystem multifunctionality during winter composting with pig manure and fallen leaves // *Journal of Science of the total environment*. 2023. Vol. 867. P. 187–198. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161529.
6. Карманов В.В., Валько Н.И. Технология и оборудование переработки отходов растительной биомассы для получения топливных брикетов, гранул и пеллет // Вестник Херсонского национального технического университета. 2015. № 1 (52). С. 92–97.
7. Gonzalez W.A., Lopez D., Perez J.F. Biofuel quality analysis of fallen leaf pellets: Effect of moisture and glycerol contents as binders // *Journals of Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. № 1. P. 1139–1150. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.094.
8. Wojcik W., Pawłowska M. Biomass as raw material for the production of biofuels and chemicals. Routledge, 2021. 240 p.
9. Юсупова А.И., Галимова Р.З., Шайхиев И.Г., Свергузова С.С. Сорбционная очистка модельных растворов от ионов железа опилками коры и листвой дуба черешчатого (*Quercus robur*) // Вестник технологического университета. 2018. № 6. С. 77–82.
10. Park J., Kim H., Kim Y., Seo D. Adsorption characteristics of anionic dye by Fe-decorated biochar derived from fallen leaves // *Korean Journal of Environmental Agriculture*. 2020. Vol. 39, Is. 4. P. 289–296. DOI: 10.5338/KJEA.2020.39.4.34.
11. Alhajali O., Ali-Nizam A., Almostafa R. Application of *Pistacia atlantica* leaves powder as natural material to remove nitrate and phosphate ions from domestic wastewater by characterization, bio-removal, and phytotoxicity studies // *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*. 2022. Vol. 9, Is. 3. P. 759–776. DOI: 10.18596/jotcsa.1026262.
12. Alorabi A., Alharthi F., Azizi M., Al-Zaqri N., Elmarghany A., Abdelshafeek K. Removal of Pb(II) from synthetic wastewater by *Lavandula pubescens* Decne. biosorbent: insight into composition-adsorption relationship // *Applied sciences*. 2020. Vol. 10, Is. 7450. DOI: 10.3390/app10217450.
13. Артемов А.В., Ершова А.С., Якимова А.Б. Изучение возможности получения пластиков без связующих веществ на основе листьев финиковой пальмы // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2023. № 3 (129). С. 1–7.
14. Ершова А.С., Савиновских А.В., Артемов А.В., Буриндин В.Г. Использование отходов лесопарковых зон для получения пластиков без добавления связующих веществ // *Леса России и хозяйство в них*. 2019. № 2 (69). С. 62–69.
15. Таурбеков А.Т., Кайдар Б.Б., Черноглазова Т.В., Мансуров З.А. Получение целлюлозных волокон из опавших листьев карагача // *Горение и плазмохимия*. 2020. Т. 118, № 3. С. 141–148.
16. Зарипова А.Р., Шайхиев И.Г., Хаматгалимова Д.Н. О возможности использования коры дуба черешчатого (*Quercus robur*) в качестве нефлесорбента // *Рациональное использование природных ресурсов и переработка технологического сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология*. 2023. С. 365–369.