**Оригинальная статья**

УДК 504:581.6
https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.220-232

# Особенности подготовки опавшей листвы для получения нефтесорбентов

**Н.А. Кальсин✉, Э.С. Насырова**

*Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия*

✉*kalsin.nikita@bk.ru*

**Аннотация**

Древесные насаждения являются неотъемлемым природным элементом городов. В осенний период во время листопада на урбанизированной территории образуется растительный отход (опавшая листва). Жилищно-коммунальные службы производят сбор и последующий вывоз опавшей листвы на полигоны твердых коммунальных отходов. Однако в рамках постепенного перехода к экономике замкнутого цикла и подготовки национального проекта «Технологическое обеспечение биоэкономики» опавшая листва может рассматриваться как ценный ресурс для вторичного использования, например, в качестве нефтесорбентов. В работе предложен способ получения нефтесорбента из опавшей листвы урбанизированной территории с применением только механических методов модификации (сушка, измельчение, гранулирование и получение подушек). Способ апробирован на собранных в пределах урбанизированной территории г. Уфы листьях ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.), нефтеемкость которых ранее не изучалась. Среди исследуемых образцов нефтесорбентов (частицы листьев *Fraxinus excelsior* L. размером от 0.1 до 5 мм, гранулы и подушка из частиц размером 2 мм) наилучший результат демонстрируют частицы с размерами 1 и 2 мм, а также подушка. Для гранул получен наихудший результат.

**Ключевые слова:** урбанизированная территория, опавшая листва, *Fraxinus excelsior* L., отход, разлив нефти, экономика замкнутого цикла, ресурс, вторичное использование

**Благодарности.** Исследовательская часть работы выполнена с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО УУНиТ.

**Для цитирования:** *Кальсин Н.А., Насырова Э.С.* Особенности подготовки опавшей листвы для получения нефтесорбентов // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2026. Т. 168, кн. 2. С. 220–232. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.220-232.

**Original article**

https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.220-232

# Leaf litter processing for the production of oil sorbents

**N.A. Kalsin✉, E.S. Nasyrova**

*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia*

✉*kalsin.nikita@bk.ru*

**Abstract**

Urban tree assemblages are an integral natural component of cities. Each autumn, during the leaf fall season, leaf waste (leaf litter) accumulates on the ground and is then collected and disposed of in municipal solid waste landfills by public services. However, as part of the gradual shift toward a circular economy and in the context of the development of the national project "Technological support of bioeconomy," fallen leaves can be recycled into valuable resources, such as oil sorbents. This article examines the production of an oil sorbent from urban leaf litter using only mechanical modification methods (drying, grinding, pelletizing, and fabrication of oil sorbent pillows). The approach was tested on fallen leaves of common ash (*Fraxinus excelsior* L.), whose oil sorption capacity has never been studied. The leaves were collected within the urbanized area of Ufa and subsequently utilized to produce oil sorbent samples (0.1–5 mm leaf particles, along with 2 mm pellets and a pillow made from leaf particles of the same size). The highest oil sorption capacity was observed for the leaf particles sized 1 and 2 mm and the pillow. The worst results were obtained for the pellets.

**Keywords:** urbanized area, fallen leaves, *Fraxinus excelsior* L., waste, oil spill, circular economy, re-source, recycling

**Acknowledgments.** The authors are grateful to the personnel of the Research Equipment Sharing Center "Nanotech" of Ufa University of Science and Technology for their assistance with instrumental analysis.

**For citation:** Kalsin N.A., Nasyrova E.S. Leaf litter processing for the production of oil sorbents. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2026, vol. 168, no. 2, pp. 220–232. https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.220-232. (In Russian)

## Введение

У каждого живого организма и растения существуют свои фенологические фазы, которые характеризуют этап его развития в определенный период времени. Одной из наиболее выраженных фенологических фаз у древесных растений является период опада листьев и подготовки растения к зимнему периоду. Опадение листьев происходит в осенний период, который связан с изменением количества получаемого растением света и необходимостью сохранения питательных веществ на весь зимний период. В процессе старения листа дерева и его опада происходят изменения: уменьшение массы, расщепление хлорофиллов и каротиноидов, синтез антоцианов [1]. В состав листьев входят такие элементы, как азот, каль-

ций, калий, магний, фосфор, сера, марганец, цинк, железо, никель, молибден, барий, медь и т. д. [2, 3]. В период старения эти элементы ремобилизуются из листьев и их содержания могут снизиться до 10 % от первоначального (90%-ная ремобилизация) в зависимости от вида растения и элемента [3].

В пределах города опавшая листва является распространенным растительным отходом в осенний период времени. Негативные факторы, связанные с появлением опавшей листвы, включают захламление, распространение инфекций и аллергенов, повышение пожарной опасности. В целях предотвращения захламления урбанизированной территории жилищно-коммунальные службы производят сбор и последующий вывоз опавшей листвы на полигоны твердых коммунальных отходов.

В настоящее время для решения проблемы с отходами идет постепенный переход к экономике замкнутого цикла и принимаются соответствующие нормативные документы. Например, основной задачей федерального закона «Об экономике замкнутого цикла» является создание замкнутых эколого-экономических циклов с максимально полным использованием поступающего сырья в производственных процессах, минимизацией образования отходов, вовлечением накопленных отходов в хозяйственный оборот с помощью рациональных методов использования ресурсов. Также следует отметить национальный проект «Технологическое обеспечение биоэкономики». В контексте этих нормативных актов опавшая листва может рассматриваться как ресурс для вторичного использования.

Опавшая листва богата целлюлозой, что дает возможность ее применения в качестве топлива в высушенном и гранулированном виде, а также она преобразуется в удобрение при компостировании. Другое свойство опавшей листвы – рельефную поверхность, в которой присутствует множество пор, – можно использовать для получения сорбентов. Все описанные свойства позволяют рассматривать опавшую листву в качестве сырья для вторичного использования.

Цель исследования – разработка технологической схемы получения нефтесорбента из опавшей листвы с применением только механических способов модификации. Для решения этой задачи рассмотрены существующие классификации нефтесорбентов в зависимости от формы материала, а также изучены сорбционные свойства полученных из опавших листьев материалов. На основе полученных данных сделано заключение о практической применимости данного нефтесорбента.

## 1. Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали опавшую листву древесного растения ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.). Листовой опад собран 23 сентября 2023 г. с запечатанной поверхности (асфальтированная поверхность, поверхность дорог) урбанизированной территории г. Уфы (54.744279 с. ш., 55.989056 в. д.). Температура окружающей среды в течение дня составила от 13 до 22 °С, влажность воздуха – от 62 до 95 %, последние осадки наблюдали 16 сентября вечером. Сбор производили ручным методом в пластиковые мешки при помощи граблей. Опавшую листву не промывали в целях сохранения условий сбора листьев жилищно-коммунальными службами в рамках мероприятий по уборке городских территорий.

Анализ нормативной документации в области определения влажности растительных материалов показал отсутствие документов, связанных с влажностью опавшей листвы. В качестве наиболее близких и подходящих методик выбраны ГОСТ 13056.3-86 «Семена

деревьев и кустарников. Методы определения влажности» [4] и ГОСТ 53233-2016 «Волокно хлопковое. Методы определения влажности» [5].

В соответствии с ГОСТ 13056.3-86 исследовали процесс сушки опавших листьев *Fraxinus excelsior* L. в муфельной печи в течение 1 ч. Массы навесок опавшей листвы составляли 2 г, что соответствует минимальному допустимому значению, температура подсушивания – 105 °С. Проводили параллельный анализ двух навесок листвы.

Естественную сушку листвы в помещении при комнатной температуре 22 °С с периодическим перемешиванием исследовали согласно ГОСТ 53233-2016. Нормативная масса образца составила 5 г.

Высушенную листву измельчали в электронном измельчителе в течение 20 с для получения частиц размером от 0.1 до 10 мм. Затем полученную массу разделяли на лабораторных ситах с размерами ячеек 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 и 10 мм. Анализируемую массу, которая составляла 100 г, высыпали в центр сита и просеивали в течение 1 мин. Остаток листьев на ситах выражали в процентах по отношению к первоначальной навеске. Долю частиц с различными размерами определяли согласно ГОСТ 16187-70 [6].

Для получения подушки измельченную массу листьев помещали в тканевой материал, после чего свободный конец затягивали/зашивали. Масса наполнителя составляла 4 г, что соответствует минимальному весу для испытания сорбции нефтепродуктов по ГОСТ 33627-2015 [7]. Гранулы получали на пресс-грануляторе ПГ-120В (ООО «Антеспром», Россия) на кафедре безопасности производства и промышленной экологии Уфимского университета науки и технологий.

Для установления морфологии структуры листа использовали растровую электронную микроскопию на приборе JSM-649 OLV (Jeol, Япония) в ЦКП «Нанотех» Уфимского университета науки и технологий. Для улучшения проводимости на поверхность листьев напыляли платину с помощью системы напыления тонких токопроводящих покрытий JFC 1600 (Jeol, Япония).

Нефтеемкость определяли по ГОСТ 33627-2015. Исследуемые образцы минимальной массой 4 г погружали в нефть на 15 мин ± 20 с (ускоренное испытание на адсорбцию нефтепродуктов). Измеряли массу исследуемых образцов до и после испытания. На основе разности масс рассчитывали нефтеемкость. Испытания проводили 3 раза. Результаты представляли в виде среднего арифметического значения, средней квадратичной погрешности и доверительного интервала (коэффициент Стьюдента при $n = 3$ и $P = 0.95$, принимали равным 4.30) [8].

## 2. Результаты и их обсуждение

Сорбенты – твердые тела, которые поглощают газы, пары или растворенные вещества. В зависимости от принципа действия выделяют адсорбенты, поглощающие загрязняющие вещества за счет пористой поверхности, и абсорбенты, образующие с загрязняющим веществом единый раствор. В соответствии с ГОСТ 33627-2015 выделяют 4 типа адсорбентов (рис. 1). В настоящее время на рынке представлены различные типы нефтесорбентов. Например, сорбирующий бон БС-3/100, имеющий размеры 100×3000 мм, с наполнителем Унисорб способен поглотить до 39 кг при массе 3 кг (нефтеемкость 13 г/г) и относится к адсорбентам III типа. По степени дисперсности он относится к комбинированным адсорбентам.

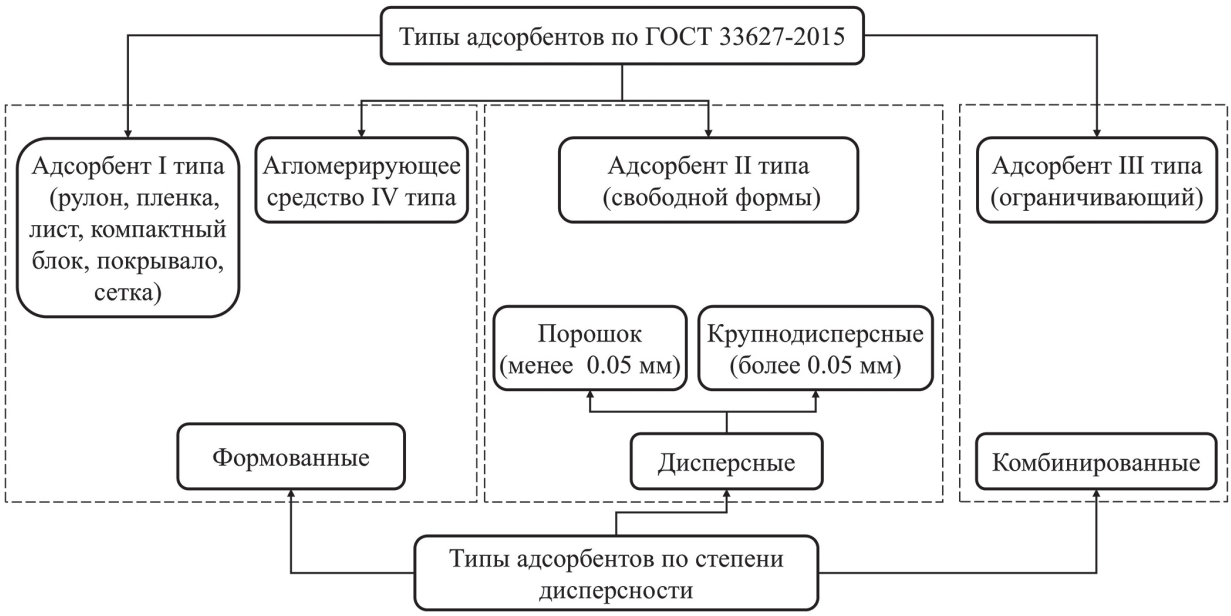



**Рис. 1.** Классификация адсорбентов в зависимости от формы
**Fig. 1.** Classification of adsorbents depending on their form

Предложена технология производства нефтесорбентов из опавшей листвы, которая включает в себя следующие этапы: сбор, сушку, измельчение, обработку (гранулирование или получение подушки) и последующее использование (рис. 2).




**Рис. 2.** Технологическая схема получения нефтесорбента из опавшей листвы
**Fig. 2.** Process flow diagram for producing oil sorbent from fallen leaves

Первый этап (сбор) подразумевает ручной или автоматический сбор опавшей листвы с твердой поверхности. Для сбора листьев используются грабли, сетки, воздуходувы, ручные или навесные пылесосы. Собранная листва помещается в мешки (обычно в пластиковые) и транспортируется на место их дальнейшего хранения.

Поскольку влажная листва, особенно помещенная в пластиковые мешки, быстро портится из-за ферментативной и микробиологической активности, для сохранения необходимых свойств опавшую листву подвергают сушке. Среди подходящих способов сушки можно выделить естественную, на солнце, в прессе, микроволновую, в печи, сублимационную, конвективную, а также сушку глицерином или силикагелем. После удаления влаги листья могут храниться в течение продолжительного периода времени. Следует отметить, что высушенная опавшая листва занимает большой объем (удельный объем может составлять 3.33–6.68 м$^3$/т).

После завершения процесса сушки опавшую листву для уменьшения объема необходимо измельчить. Для этого используют различные виды дробилок, мельниц и измельчителей. В результате этой процедуры получается материал в виде частиц различного размера, который помещается в контейнеры для хранения и дальнейшего использования.

Следующим этапом предложенной технологии (рис. 2) является модификация измельченного материала путем формирования подушки или гранулирования. Модификация материала зависит от условий применения продукта (твердая или водная поверхность разлива нефти или нефтепродуктов). В процессе формирования подушки необходимо подобрать материал оболочки, поскольку она также способна сорбировать нефть/нефтепродукты. Хлопковые материалы обладают лучшей сорбционной способностью, однако имеют более высокую стоимость, синтетические материалы являются более экономичными, но их сорбционная способность ниже [9]. Гранулирование производят с помощью грануляторов, получая на выходе гранулы, представляющие собой спрессованный материал цилиндрической формы. В зависимости от объемов производства может использоваться как более компактное, так и более производительное оборудование.

Следует отметить, что в представленной схеме применяется только механическая модификация сырья без известных методов физико-химической модификации ацетилированием [10], мерсеризацией [11], этерификацией [12] и др., поскольку в результате этого повышается стоимость производства продукта, а также появляется необходимость в его дополнительной очистке и подготовке.

Предложенная технология апробирована на опавшей листве *Fraxinus excelsior* L.

1 этап – сбор. После сбора опавшей листвы для описания общей формы и структуры листьев отобраны пять лучших образцов. В процессе опадания и нахождения на поверхности земли листья *Fraxinus excelsior* L. отделяются от стебля, к которому были присоединены черешком, и находятся отдельно от него. Опавшие листья обладают ярко выраженным рыжим оттенком. Длина листьев варьируется от 6.8 до 12 см, а ширина – от 2.8 см до 6.5 см. Листья имеют продолговатую форму с черешками размером от 1.8 до 0.2 см. Ярко выражена крупная головная жилка, от которой исходят более мелкие жилки, формирующие поверхность листа. Средняя длина листа равна 8.6 см, ширина – 4.7, длина черешка – 0.9 см, масса листа – 0.17 г.

Снимки растровой электронной микроскопии листьев *Fraxinus excelsior* L. приведены на рис. 3. Листья имеют рельефную структуру со множеством пор, полостей, фиссур и неровностей. Благодаря такой неоднородной и непостоянной структуре происходит сорбция загрязняющих веществ, в частности, нефти и нефтепродуктов. Белые частицы представляют собой частицы пыли, на которые не попало напыление и поэтому они заряжались быстрее листвы.

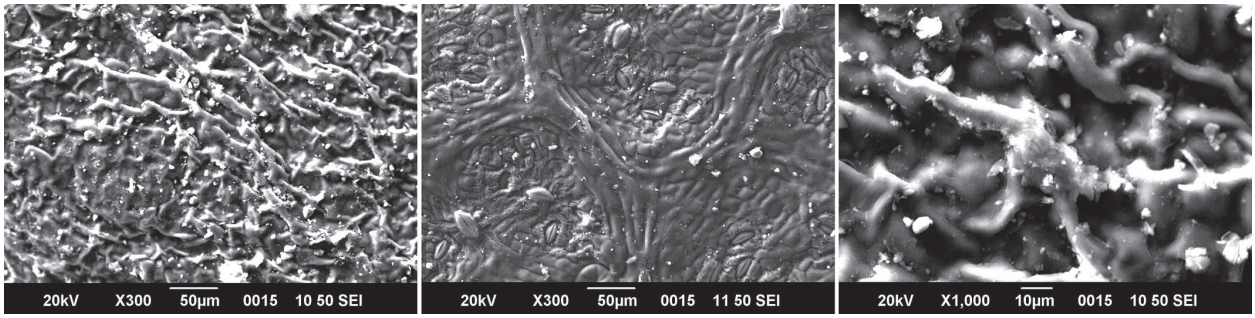



**Рис. 3.** Поверхность листьев *Fraxinus excelsior* L. по данным растровой электронной микроскопии
**Fig. 3.** Surface of *Fraxinus excelsior* L. leaves based on the scanning electron microscopy data

2 этап – сушка. Для оценки эффективности различных способов сушки проведено сравнение сушки листьев в муфельной печи и естественной сушки при комнатной температуре.

Масса двух образцов листьев *Fraxinus excelsior* L. после первого часа сушки в муфельной печи составила 1.55 г и 1.54 г соответственно. При этом изменение массы относительно исходного веса (2 г) составило 22.5 и 23.0 % для первого и второго образцов соответственно. После второго часа сушки в муфельной печи масса образцов не изменилась, следовательно, влажность листьев *Fraxinus excelsior* составила 22.8 %. Расхождение результатов между двумя образцами не превышает допустимые 0.5 %.

В процессе естественной сушки два параллельных опыта показали, что уменьшение массы прекращается на 4 день сушки при комнатной температуре. Расхождение между двумя значениями также не превышает допустимые 0.5 %. При сушке в муфельной печи можно достичь более быстрой сушки, при этом объем высушиваемой массы ограничен вместительностью печи, что снижает производительность процесса сушки сырья. Поэтому в качестве менее энергозатратного и более экономичного способа предлагается естественная сушка.

3 этап – измельчение. В целях объединения процессов измельчения и сортировки частиц по размерам разработан измельчитель опавшей листвы, на который получен патент [13]. В результате измельчения распределение частиц по размерам оказалось неравномерным: 10 мм – 0.50 %, 5 мм – 25.03 %; 2 мм – 41.54 %; 1 мм – 22.47 %; 0.5 мм – 6.91 %; 0.25 мм – 2.54 %; 0.1 мм – 1.01 %. Наибольшую часть составили частицы с размерами 1, 2 и 5 мм.

Согласно рис. 1 все полученные частицы опавшей листвы являются крупнодисперсными. В зависимости от размера частиц выделены три группы: крупные (≥ 5.0), средние (1.0–2.0 мм) и мелкие (0.1–0.5 мм). Следует отметить, что частицы малоприменимы для ликвидации аварийных разливов нефти с локализацией на поверхности грунта в условиях ветра, так как они легкие и могут распространяться под воздействием ветра по поверхности нефтяного разлива, поэтому для их применения необходима дополнительная модификация. В целях минимизации этого фактора, а также снижения расходов на транспортировку [14] полученное сырье гранулируется или помещается в ткань для формирования подушки.

4 этап – получение гранул и подушки. В качестве сырья использованы частицы размером 2 мм, поскольку они наиболее многочисленные. Сформированная подушка приведена на рис. 4, *а*, ее насыпная плотность составила 0.07 г/см$^2$. На предлагаемый способ получения гранулированного нефтесорбента из листового опада получен патент на изобретение [15]. Для гранулирования также использованы частицы размером 2 мм, поскольку оптимальными при гранулировании растительного сырья считаются размеры частиц от 1 до 3 мм [16]. На выходе получены гранулы коричневатого цвета (рис. 4, *б*), которые остывали при комнатной температуре.

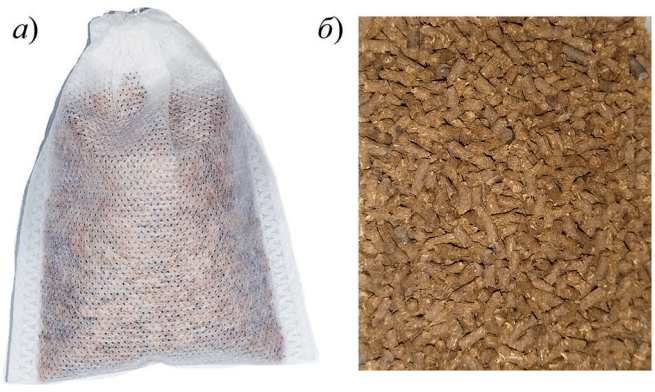



**Рис. 4.** Внешний вид нефтесорбента в виде подушки (*а*) и в виде гранул (*б*)
**Fig. 4.** Oil sorbent as a pillow (*a*) and pellets (*b*)

Таким образом, получено три вида нефтесорбента: измельченные частицы в виде порошка и хлопьев, подушка и гранулы. В целях практической реализации полученных нефтесорбентов из опавшей листвы проведено исследование их сорбционной способности по величине нефтеемкости. Результаты краткосрочных испытаний образцов на адсорбцию сырой нефти представлены на рис. 5.

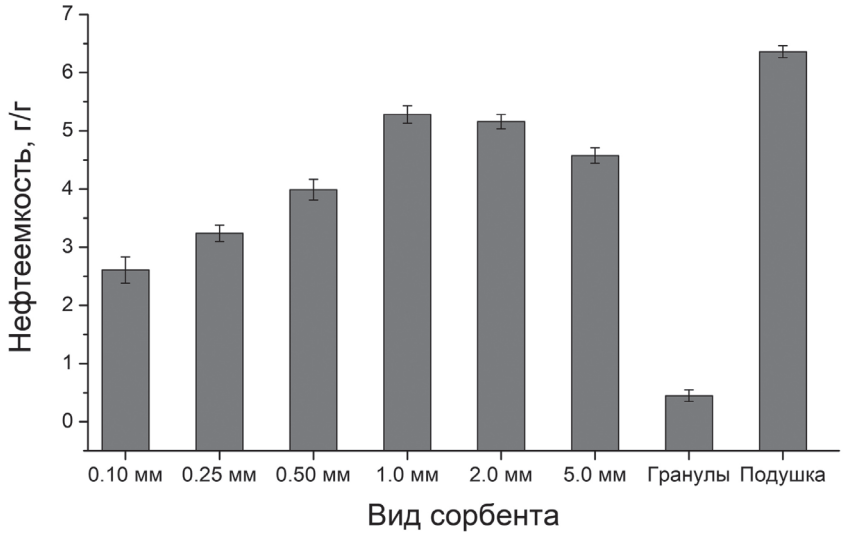



**Рис. 5.** Нефтеемкость анализируемых нефтесорбентов
**Fig. 5.** Oil sorption capacity of the tested oil sorbents

Среди исследуемых образцов нефтесоребнтов наилучший результат демонстрируют частицы с размерами 1 и 2 мм, а также подушка, заполненная частицами размером 2 мм. В соответствии с классификацией сорбентов по сорбционной способности, полученный нефтесорбент обладает средней нефтеемкостью (5–15 г/г). Гранулы показали наихудший результат среди всех исследуемых образцов, что, возможно, обусловлено закупориванием пор вследствие сжатия и уменьшения площади поверхности и доступности пор для сорбата [16].

Опавшая листва является распространенным растительным отходом урбанизированных территорий не только в Российской Федерации, но и в других странах. Поэтому существует множество работ по применению таких отходов в качестве сырья для производства новых продуктов, в частности, сорбентов. Однако каждая страна рассматривает опавшую листву деревьев, характерных для своей территории.

Анализ зарубежных исследований по применению листьев в качестве нефтесорбентов представлен в работе [17]. Для очистки водной среды от нефти изучен порошок (размер частиц 355–500 мкм) из листьев маслиничной пальмы, модифицированных лауриновой кислотой, сорбционная емкость которого составила 1.2 г/г [18]. В работе [19] для этих же целей рассмотрены измельченные листья манго. При использовании 0.15 г адсорбента в течение 3 мин максимальная сорбционная способность достигла 6.66 г/г. Показана возможность очистки водной среды от нефти с помощью листьев *Musa parasidiaca* L., причем в зависимости от концентрации нефти, температуры водно-нефтяной среды, дозировки сорбента и размера частиц сорбента сорбционная способность варьируется в диапазоне 2.48–14.04 г/г [20].

Отечественные исследователи также рассматривают применение сорбентов из опавшей листвы для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов и нефти различной

вязкости [21], возникающих на технологических этапах добычи и переработки нефти [22]. Так, предложена схема производства сорбционного материала [23], включающая ленточный конвейер, просеиватель вибрационный, сушильную камеру, измельчитель-шредер и высокочастотный плазменный генератор. В соответствии со схемой смешанный листовой опад обрабатывается плазмой в атмосфере смеси газов аргон–пропан. Нефтеемкость березового опада составляет 3.94–7.24 г/г, тополиного опада – 4.89–8.89 г/г, дубового опада – 3.25–5.45 г/г, смешанного опада – 6.01–10.64 г/г. Рассмотрена возможность применения для очистки сточных вод целлюлозосодержащих отходов, в том числе опавшей листвы, с различными вариантами модификаций процесса, включающими обработку сырья раствором серной кислоты, обработку плодовых оболочек злаковых культур в потоке высокочастотной емкостной низкотемпературной плазмы в среде пропана с бутаном, а также обработку при температуре 150 °C в присутствии кислорода (нефтеемкость березового опада равна 7.24 г/г, тополиного опада – 8.89 г/г, дубового опада – 5.44 г/г, смешанного листового опада – 10.56 г/г) [24].

Предложенная в настоящей работе технология отличается от рассмотренных отечественных работ использованием исключительно механической модификации листового опада без применения плазменной или химической обработки. При этом следует отметить, что исследования по сорбции нефти и нефтепродуктов листьями *Fraxinus excelsior* L. отсутствуют, а в работах [25, 26] рассматривают только древесные опилки.

## Заключение

Предложен и апробирован на листьях *Fraxinus excelsior* L. способ получения нефтесорбента из опавшей листвы урбанизированной территории, основанный на механической модификации. Сравнительный анализ с имеющимися литературными данными по нефтесорбентам из растительных материалов показал, что листья *Fraxinus excelsior* L. характеризуются конкурентной сорбционной способностью. Механическая модификация опавшей листвы путем гранулирования приводит к уменьшению сорбционной способности относительно негранулированных частиц, что может быть обусловлено снижением удельной площади поверхности и перекрытием пор. Для получения качественных гранул при обработке растительного сырья можно добавлять пористые связующие, что требует проведения более детальных исследований.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflicts of Interest.** The authors declare no conflicts of interest.

## Литература

1. *Keskitalo J., Bergquist G., Gardeström P., Jansson S.* A cellular timetable of autumn senescence // Plant Physiol. 2005. V. 139, No 4. P. 1635–1648. https://doi.org/10.1104/pp.105.066845.
2. *Ali Smith Y.R.* Determination of chemical composition of *Senna-siamea* (Cassia leaves) // Pak. J. Nutr. 2009. V. 8, No 2. P. 119–121. https://doi.org/10.3923/pjn.2009.119.121.
3. *Maillard A., Diquélou S., Billard V., Laîné P., Garnica M., Prudent M., Garcia-Mina J.-M., Yvin J.-C., Ourry A*. Leaf mineral nutrient remobilization during leaf senescence and modulation by nutrient deficiency // Front. Plant Sci. 2015. V. 6. Art. 317. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00317.
4. ГОСТ 13056.3-86. Семена деревьев и кустарников. Методы определения влажности. М.: Изд-во стандартов, 1986. 15 с.

5. ГОСТ Р 53233-2016. Волокно хлопковое. Методы определения влажности. М.: Стандартинформ, 2016. 7 с.
6. ГОСТ 16187-70. Сорбенты. Методы определения фракционного состава. М.: Изд-во стандартов, 1970. 4 с.
7. ГОСТ 33627-2015. Уголь активированный. Стандартный метод определения сорбционных характеристик адсорбентов. М.: Стандартинформ, 2016. 15 с.
8. *Джонсон Н*., *Лион Ф.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. М.: Мир, 1980. 610 с.
9. *Филина Н.А.* Исследование сорбционных свойств древесных отходов для сбора нефтепродуктов с последующей утилизацией их в виде топливных брикетов: дис. … канд. техн. наук. Пенза, 2011. 173 с.
10. *Obi A.I., Ajiwe V.I., Okonkwo C.P.* Equilibrium and kinetic studies of crude oil sorption on unmodified and modified Napier grass // Makara J. Sci. 2023. V. 27, No 2. P. 115−128. https://doi.org/10.7454/mss.v27i2.1458.
11. *Gong L., Sun W., Kong L.* Adsorption of methylene blue by NaOH-modified dead leaves of plane trees // Comput. Water, Energy, Environ. Eng. 2013. V. 2, No 2B. P. 13–19. https://doi.org/10.4236/cweee.2013.22B003.
12. *Cheu S.C., Kong H., Song S.T., Saman N., Johari K., Mat H.* High removal performance of dissolved oil from aqueous solution by sorption process using fatty acid esterified pineapple leaf as novel sorbents // RSC Adv. 2016. V. 6, No 17. P. 13710–13722. https://doi.org/10.1039/C5RA22929D.
13. *Кальсин Н.А., Насырова Э.С., Елизарьев А.Н.* Измельчитель опавшей листвы // Патент РФ на полезную модель № 225257. 2024. Бюл. ФИПС № 11.
14. *Mudryk K., Jewiarz M., Wróbel M., Niemiec M., Dyjakon A.* Evaluation of urban tree leaf biomass-potential, physico-mechanical and chemical parameters of raw material and solid biofuel // Energies. 2021. V. 14, No 4. Art. 818. https://doi.org/10.3390/en14040818.
15. *Насырова Э.С., Кальсин Н.А., Елизарьев А.Н.* Способ получения гранулированного нефтесорбента из листового опада // Патент РФ на изобретение № 2826205. 2024. Бюл. ФИПС № 25.
16. *Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Деев К.А.* Влияние различных параметров на процесс гранулирования растительного сырья и качество гранул (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023. Т. 24, №. 1. С. 30–45. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.30-45.
17. *Кальсин Н. А., Насырова Э. С., Бондарь К. Е., Нафикова Э. В.* Природные нефтесорбенты растительного происхождения и их эффективность (обзор зарубежных работ) // Вестник Евразийской науки. 2024. Т. 16, № 2. Статья 61.
18. *Sidik S.M., Jalil A.A., Triwahyono S., Adam S.H., Satar M.A.H., Hameed B.H.* Modified oil palm leaves adsorbent with enhanced hydrophobicity for crude oil removal // Chem. Eng. J. 2012. V. 203. P. 9–18. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.132.
19. *Abutaleb A*. Kinetics, isotherm, and thermodynamics of oil spill removal from seawater onto mango leaves // Desalin. Water Treat. 2022. V. 278. P. 311–318. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.29090.
20. *Eboibi B.E., Ogbue M.C., Udochukwu E.C., Umukoro J.E., Okan L.O., Agarry S.E., Aworanti O.A., Ogunkunle O., Laseinde O.T.* Bio-sorptive remediation of crude oil polluted sea water using plantain (*Musa parasidiaca*) leaves as bio-based sorbent: Parametric optimization by Taguchi technique, equilibrium isotherm and kinetic modelling studies // Heliyon. 2023. V. 9, No 11. Art. e21413. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21413.
21. *Rasulov S.R., Kelbaliyev G.I., Karimli V.I., Abdullayeva N.A.* Formation of structures in media containing oil // SIIT. 2025. V. 7, No 2 (21). P. 103–108. https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p107.
22. *Kelbaliyev G.I., Rasulov S.R., Manafov M.R., Shikhieva F.R., Abdullayeva N.A.* Study of modern methods of removing deposits formed in oil equipment and pipes // SIIT. 2025. V. 7, No 4 (23). P. 29–37. https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no4-p29.

23. *Алексеева А.А., Степанова С.В.* Применение листового опада в качестве основы сорбционного материала при ликвидации аварийных разливов нефти с поверхности воды. Казань: Изд-во КНИТУ, 2019. 132 с.

24. *Степанова С.В.* Теория, методы и принципы получения полифункциональных сорбционных материалов на основе целлюлозосодержащих отходов для очистки воды от нефти и ионов металлов: дис. ... д-ра. техн. наук, Казань, 2023. 232 с.

25. *Sippel I.Ya., Akhmetgaleeva G.A., Magdin K.A.* Application of modified ash-tree sawdust for oil removal from water surfaces // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. V. 699. Art. 012031. https://doi.org/10.1088/1755-1315/699/1/012031.

26. *Денисова Т.Р., Шайхиев И.Г., Сиппель И.Я.* Увеличение нефтеемкости опилок ясеня обработкой растворами кислот // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 17. С. 233–236.

## References

1. Keskitalo J., Bergquist G., Gardeström P., Jansson S. A cellular timetable of autumn senescence. *Plant Physiol.*, 2005, vol. 139, no. 4, pp. 1635–1648. https://doi.org/10.1104/pp.105.066845.

2. Ali Smith Y.R. Determination of chemical composition of *Senna-siamea* (Cassia leaves). *Pak. J. Nutr.*, 2009, vol. 8, no. 2, pp. 119–121. https://doi.org/10.3923/pjn.2009.119.121.

3. Maillard A., Diquélou S., Billard V., Laîné P., Garnica M., Prudent M., Garcia-Mina J.-M., Yvin J.-C., Ourry A. Leaf mineral nutrient remobilization during leaf senescence and modulation by nutrient deficiency. *Front. Plant Sci.*, 2015, vol. 6, art. 317. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00317.

4. State Standard 13056.3-86. Seeds of trees and shrubs. Methods for determination of moisture. Moscow, Izd. Standartov, 1986. 15 p. (In Russian)

5. State Standard R 53233-2016. Cotton fiber. Methods of moisture determination. Moscow, Standart-inform, 2016. 7 p. (In Russian)

6. State Standard 16187-70. Sorbents. Method for determination of granular composition Moscow, Izd. Standartov, 1970. 4 p. (In Russian)

7. State Standard 33627-2015. Activated carbon. Standard test method for determination of sorbent performance of adsorbents. Moscow, Standartinform, 2016. 15 p. (In Russian)

8. Johnson N., Leone F. *Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody obrabotki dannykh* [Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences. Data Processing Methods]. Moscow, Mir, 1980. 610 p. (In Russian)

9. Filina N.A. Sorption properties of wood waste for the recovery of petroleum products with subsequent disposal as fuel briquettes. *Cand. Sci. (Engineering) Diss.* Penza, 2011. 173 p. (In Russian)

10. Obi A.I., Ajiwe V.I., Okonkwo C.P. Equilibrium and kinetic studies of crude oil sorption on unmodified and modified Napier grass. *Makara J. Sci.*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 115−128. https://doi.org/10.7454/mss.v27i2.1458.

11. Gong L., Sun W., Kong L. Adsorption of methylene blue by NaOH-modified dead leaves of plane trees. *Comput. Water, Energy, Environ. Eng.*, 2013, vol. 2, no. 2B, pp. 13–19. https://doi.org/10.4236/cweee.2013.22B003.

12. Cheu S.C., Kong H., Song S.T., Saman N., Johari K., Mat H. High removal performance of dissolved oil from aqueous solution by sorption process using fatty acid esterified pineapple leaf as novel sorbents. *RSC Adv.*, 2016, vol. 6, no. 17, pp. 13710–13722. https://doi.org/10.1039/C5RA22929D.

13. Kalsin N.A., Nasyrova E.S., Elizarev A.N. Fallen leaf shredder. Patent RF no. 225257. *Byull. FIPS*, 2024, no. 11. (In Russian)

14. Mudryk K., Jewiarz M., Wróbel M., Niemiec M., Dyjakon A. Evaluation of urban tree leaf biomass-potential, physico-mechanical and chemical parameters of raw material and solid biofuel. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 4, art. 818. https://doi.org/10.3390/en14040818.

15. Nasyrova E.S., Kalsin N.A., Elizarev A.N. Method of producing granulated oil sorbent from leaf litter. Patent RF no. 2826205. *Byull. FIPS*, 2024, no. 25. (In Russian)
16. Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Deev K.A. Influence of various parameters on the vegetable raw material pelleting process and pellets quality (review). *Agric. Sci. Euro-North-East*, 2023, vol. 24, no. 1, pp. 30–45. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.30-45. (In Russian)
17. Kalsin N.A., Nasyrova E.S., Bondar K.E., Nafikova E.V. Natural plant oil sorbents of plant origin and their effectiveness (review of foreign works). *Eurasian Sci. J.*, 2024, vol. 16, no. 2, art. 61. (In Russian)
18. Sidik S.M., Jalil A.A., Triwahyono S., Adam S.H., Satar M.A.H., Hameed B.H. Modified oil palm leaves adsorbent with enhanced hydrophobicity for crude oil removal. *Chem. Eng. J.*, 2012, vol. 203, pp. 9–18. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.132.
19. Abutaleb A. Kinetics, isotherm, and thermodynamics of oil spill removal from seawater onto mango leaves. *Desalin. Water Treat.*, 2022, vol. 278, pp. 311–318. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.29090.
20. Eboibi B.E., Ogbue M.C., Udochukwu E.C., Umukoro J.E., Okan L.O., Agarry S.E., Aworanti O.A., Ogunkunle O., Laseinde O.T. Bio-sorptive remediation of crude oil polluted sea water using plantain (*Musa parasidiaca*) leaves as bio-based sorbent: Parametric optimization by Taguchi technique, equilibrium isotherm and kinetic modelling studies. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 11, art. e21413. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21413.
21. Rasulov S.R., Kelbaliyev G.I., Karimli V.I., Abdullayeva N.A. Formation of structures in media containing oil. *SIIT*, 2025, vol. 7, no. 2 (21), pp. 103–108. https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p107.
22. Kelbaliyev G.I., Rasulov S.R., Manafov M.R., Shikhieva F.R., Abdullayeva N.A. Study of modern methods of removing deposits formed in oil equipment and pipes. *SIIT*, 2025, vol. 7, no. 4 (23), pp. 29–37. https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no4-p29.
23. Alekseeva A.A., Stepanova S.V. *Primenenie listovogo opada v kachestve osnovy sorbtsionnogo materiala pri likvidatsii avariinykh razlivov nefti s poverkhnosti vody* [Using Leaf Litter as a Sorption Substrate for Emergency Clean Up of Oil Spills from the Water Surface]. Kazan, Izd. KNITU, 2019. 132 p. (In Russian)
24. Stepanova S.V. Theory, methods, and principles of producing polyfunctional sorption materials based on cellulose-containing waste for water purification from oil and metal ions. *Dr. Sci. (Engineering) Diss.* Kazan, 2023. 232 p. (In Russian)
25. Sippel I.Ya., Akhmetgaleeva G.A., Magdin K.A. Application of modified ash-tree sawdust for oil removal from water surfaces. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 699, art. 012031. https://doi.org/10.1088/1755-1315/699/1/012031.
26. Denisova T.R., Shaikhiev I.G., Sippel I.Ya. Increasing the oil absorption capacity of ash sawdust by treating it with acid solutions. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta*, 2015, vol. 18, no. 17, pp. 233–236. (In Russian)

## Информация об авторах

**Никита Александрович Кальсин**, аспирант кафедры безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский университет науки и технологий
E-mail: *kalsin.nikita@bk.ru*
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9745-0069

**Элина Сагитовна Насырова**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский университет науки и технологий
E-mail: *ElinaSagitovna@yandex.ru*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7642-4286

## Author Information

**Nikita A. Kalsin**, Postgraduate Student, Department of Production Safety and Industrial Ecology, Ufa University of Science and Technology
E-mail: *kalsin.nikita@bk.ru*
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9745-0069

**Elina S. Nasyrova**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Production Safety and Industrial Ecology, Ufa University of Science and Technology
E-mail: *ElinaSagitovna@yandex.ru*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7642-4286

Поступила в редакцию 18.06.2025
Принята к публикации 11.08.2025

Received June 18, 2025
Accepted August 11, 2025