Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2024, Том 16, № 2 / 2024, Vol. 16, Iss. 2 https://esj.today/issue-2-2024.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/44NZVN224.pdf

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Кальсин, Н. А. Природные нефтесорбенты растительного происхождения и их эффективность (обзор зарубежных работ) / Н. А. Кальсин, Э. С. Насырова, К. Е. Бондарь, Э. В. Нафикова // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. — URL: https://esj.today/PDF/44NZVN224.pdf

For citation:
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). *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(2): 44NZVN224. Available at: https://esj.today/PDF/44NZVN224.pdf. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 504.06

Кальсин Никита Александрович
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия
Ассистент, аспирант
E-mail: kalsin.nikita@bk.ru

Насырова Элина Сагитовна
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: nasyrova.es@ugatu.su
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=623024

Бондарь Кристина Евгеньевна
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: bondar.ke@ugatu.su
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=778636

Нафикова Эльвира Валериковна
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия
Доцент
Кандидат географических наук, доцент
E-mail: nafikova.ev@ugatu.su
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=715619

Природные нефтесорбенты растительного происхождения и их эффективность (обзор зарубежных работ)

Аннотация. Для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов используются разнообразные методы и средства, одним из таких средств являются сорбенты, которые разделяются на: синтетические, неорганические и органические. Для получения органических сорбентов широко используют растения. Зарубежные исследователи в своих работах анализируют сорбционную способность различных морфологических частей растений, в том числе модифицируя их разнообразными методами: гидротермальная и термообработка, ацетилирование, использование растворов $NaClO_2$ и NaOH, стеарата кальция и жирных кислот.

В проанализированных работах наибольшая нефтеемкость зафиксирована у волокон плодов Calotropis procera, обработанных температурой 200°C (124,6–180,95 г/г), далее в порядке уменьшения идут волокна плодов Populus nigra, Ceiba pentandra и Gossypium herbaceum. Среди рассмотренных зарубежными исследователями растений есть виды, произрастающие на территории РФ. К ним относятся Populus nigra (тополь черный), Urtica dioica (крапива двудомная), Gossypium herbaceum (хлопчатник травянистый), Zea mays (кукуруза сахарная) и Oryza sativa (рис посевной). «Тополиный пух», как и опавшие листья, являются растительными отходами урбанизированной территории, а початки Zea mays и плодовая оболочка зерен Oryza sativa относятся к сельскохозяйственным отходам. Применение растительных отходов в получении нового продукта (сорбента) относится к экономике замкнутого цикла. Скрининговые исследования, проведенные авторами, показали, что листовой опад Quercus robur с размерами частиц 5,0 мм имеет нефтеемкость 5,70 г/г, с размерами частиц 2,0 мм — 4,67 г/г; листовой опад Acer platanoides с размерами частиц 2,0 мм имеет нефтеемкость 4,77 г/г; а листовой опад Betula pendula с размерами частиц 2,0 мм имеет нефтеемкость 4,79 г/г.

Ключевые слова: разлив нефти; природный сорбент; сорбционная способность; волокно Calotropis procera; волокно Populus nigra; трава Urtica dioica; экономика замкнутого цикла

Введение

Нефтяная отрасль занимает одну из ключевых ролей в промышленности России и включает в себя комплекс предприятий по добыче, транспортировке, переработке нефти, распределению и хранению нефтепродуктов. В соответствии с ГОСТ Р 51858-2002 добываемая нефть различается по массовой доли серы (1–4 классы), плотности, выходу фракций и массовой доли парафина (5 типов). Из нефти производят значительное количество продуктов, по ГОСТ ISO 8681-2013 выделяют основные классы: топливо (F); растворители и сырье для химической промышленности (S); смазочные материалы, индустриальные масла и родственные им продукты (L); парафины (W) и битумы (B).

На всех этапах — от добычи до хранения вероятны аварийные разливы нефти и нефтепродуктов как на различных твердых поверхностях (искусственное покрытие: асфальтированная или бетонированная поверхность, естественное покрытие: почва, поверхность, покрытая растительностью, снег, лед [1]), так и на водной поверхности. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов происходят ежегодно и оказывают негативное влияние на окружающую среду [2].

Для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов используются разнообразные методы и средства, которые позволяют локализовать разлив, собрать нефть и нефтепродукты и удалить их с поверхности. Одним из таких средств являются сорбенты. В зависимости от происхождения сорбенты разделяют на: синтетические (полистирол, полиуретан), неорганические (глина, песок) и органические (торф, опилки, мох, шерсть). Для получения органических сорбентов широко используют растения высшего подцарства. В соответствии с морфологическим строением растений включающей корни, ствол, ветки, листья, цветки, плод (кожица/кожура, мякоть, косточки, семена), каждый из элементов в отдельности может быть использован в качестве сорбента. Целью данной работы является обзор природных нефтесорбентов растительного происхождения, описанных в зарубежной научной литературе за последние 10 лет. Данная работа будет интересна исследователям в области нефтесорбентов и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Обзор имеющихся тематических публикаций

В 2021 году Sri Martini и Sharmeen Afroze [3] опубликовали обзор работ по органическим сорбентам из растительных отходов. В работе рассмотрены кора эвкалипта и сосны, остатки древесины, кожура банана и арбуза, рисовая шелуха и листья *Platanus orientalis*, *Magnolia denudate*, *Magnolia grandiflora*, *Michelia figo*, *Betula pendula* и *Azadirachta Indica*, которые применялись для удаления ионов металлов и красителей из водной среды, а также нефти и нефтепродуктов. Например, промытая дистиллированной водой, высушенная при 105°C в течение 24 часов в лабораторной печи и измельчённая в механической дробилке до получения порошкообразной формы и модифицированная комбинацией H_3PO_4 и карбонизации кора эвкалипта при дозировке 10 г/л показала эффективность 91 % при сорбции нефти из неочищенных сточных вод нефтеперерабатывающего завода British Petroleum Kwinana в Западной Австралии. В своем обзоре [4] Miltiadis Zamparas и другие рассматривали органические сорбенты растительного происхождения в контексте их подготовки различными методами для повышения гидрофобности. Среди методов подготовки выделены механические и термические; гидротермальные; химические: мерсеризация; ацетилирование; полимеризация и создание аэрогеля.

Большинство исследователей изучают отдельные морфологические части растений в качестве сорбентов. Среднее дерево имеет около 40 тысяч листьев общей площадью 80–120 м^2, которые могут быть использованы как сорбент. Например, Mohamed A. Mahmoud и другие [5] использовали листья *Lawsonia inermis* для очистки водной среды от разливов моторного масла. Листья промывались дистиллированной водой, сушились при температуре 80°C в течение 24 часов и разделялись на части размером 0,5 см. При комнатной температуре в 28°C оптимальная сорбционная емкость достигала 1,6 г/г за 2 минуты. T.H. Ibrahim и другие в своей работе [6] применяли порошок из листьев *Olea europaea*, обработанных н-гексаном в качестве сорбента для удаления нефти из смоделированной пластовой воды. Сорбент показал сорбционную способность на уровне 0,143 г/г. B. Nechchadi и другие [7] изучали способность черешков листьев *Phoenix dactylifera* удалять дизельное моторное масло и нефтесодержащие отходы из деминерализованной и природной морской воды. Сорбционная способность составила 12,49–13,56 г/г. Отжим сорбентов приводил к их частичной деградации. Установлена возможность использования сорбентов, насыщенных маслами, в качестве горючих материалов.

Конечным этапом развития цветка является плод, сорбционные свойства которого также изучаются зарубежными авторами. Например, Robabeh Asadpour и другие [8] использовали необработанные и модифицированные волокна из пустых гроздей плодов *Elaeis guineensis* в качестве сорбента для ликвидации нефтяных разливов в морской среде. Модификация выполнялась путем этерификации волокон олеиновой кислотой. Наивысшая сорбционная способность составила 5,8 г/г для нефти Tapis и 5,96 г/г для нефти Arabian.

В своей работе [9] Yongsoon Shin и другие проводили улучшение нефтесорбционных свойств волокон плодов *Gossypium herbaceum* воздействием жирных кислот C_{18}. Сорбционная способность модифицированного волокна составила 35,58 г/г, что на 49 % больше сорбционной способности необработанного хлопкового волокна, также повысилась гидрофобность сорбента. Vinitkumar Singth и другие [10] разработали сорбент из необработанных волокон плодов *Gossypium herbaceum* в виде ватина. Сорбционная емкость по моторному маслу составила 50,27 г/г.

Еще одним представителем семейства Мальвовые (*Malvaceae*) является *Ceiba pentandra*. Волокна плода *Ceiba pentandra* по внешнему виду похожи на хлопок и называются капок (рис. а).

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

а

б

Рисунок. *Плоды: а — Ceiba pentandra*[1]*; б — Calotropis Procera*[2]

Sara Vinothini Pannirselvam и другие [11] исследовали сорбционные свойства необработанных и модифицированных NaOH волокон плодов *Ceiba pentandra* в сравнении с полипропиленовым волокном для удаления моторного масла. Сорбционная способность необработанных волокон составила 49,51 г/г, модифицированного волокна — 62,63 г/г, в то время как у полипропиленового волокна — 30,01 г/г. В работе [12] авторы модифицировали плоды *Ceiba pentandra* стеаратом кальция. Волокна капока, покрытые стеаратом кальция, продемонстрировали более высокую гидрофобность по сравнению с необработанными волокнами, а также сорбционную способность по моторному маслу на уровне 50 г/г.

Yanfang Xu и другие в своей работе [13] исследовали влияние температуры на сорбционную способность, а также гидрофобные и олеофильные свойства порошка из волокон капока. Сорбционная способность порошка из волокон капока различалась на 5 % при температуре от 20°C до 90°C, при этом значения для моторного и минерального масла составляли 10,42–10,96 г/г и 10,18–10,73 г/г соответственно. В исследованиях Leonardo M.T.M. Oliveira и других [14] сорбционная способность волокон капока достигала 58,462 ±6,733 г/г. Авторы также установили, что волокна состоят из алифатических и ароматических углеводородов, что обуславливает их гидрофобные и олеофильные свойства.

Волокна плодов *Calotropis Procera* также внешне похожи на хлопок (рис. б), в связи с этим некоторые авторы исследовали его сорбционные свойства. Например, Larissa Sobral Hilario и другие [15] исследовали сорбционные свойства не обработанных и термически обработанных волокон плодов *Calotropis Procera* при ликвидации разливов нефти. Из собранных плодов удалялись семена, затем полученное волокно сушилось при комнатной температуре 25 ±1°C в течение 24 часов и также термически обрабатывалось в муфельной печи при температуре 150°C и 200°C в течение часа. Нефтеемкость необработанного волокна плодов *Calotropis Procera* составила 76,32 г/г, обработанного температурой 150°C — 94,31–103,37 г/г и обработанного температурой 200°C — 124,6–180,95 г/г. Другие исследователи [16] модифицировали волокна плодов *Calotropis Procera* растворами NaOH, $NaClO_2$ и гидротермальной обработкой в воде для улучшения их нефтесорбционных свойств. Максимальная сорбционная способность при удалении нефти из воды составила 92,0 г/г, 99,2 г/г и 103,9 г/г для волокон, модифицированных раствором $NaClO_2$, гидротермальной обработкой и раствором NaOH, соответственно.

[1] Капок (Ceiba pentandra). Ботанические характеристики и использование волокна. URL: https://ru.sbenny.com/blog/gardening/trees/fruit-trees/kapok-ceiba-pentandra-botanical-characteristics-and-uses-of-the-fiber/ (дата обращения 14.01.2024).

[2] Calotropis procera (Aiton) Aiton f. (семейство Asclepiadaceae) Калотропис высокий. URL: https://www.plantarium.ru/page/image/id/180739.html (дата обращения: 14.01.2024).

Характерным видом для умеренных широт является *Populus nigra*, плоды которого имеют пучок тонких шелковистых волокон («тополиный пух»). Yanfang Xu и другие [17] оценили сорбционные характеристики волокон плодов *Populus nigra* для ликвидации разливов нефтепродуктов. Волокна представляют собой лигноцеллюлозный материал с гладкой поверхностью и полыми просветами, сорбционная способность которых составила 53,74 г/г для дизельного топлива и 65,85 г/г для моторного масла.

Еще одним морфологическим элементов растений является плодовая оболочка, представляющая собой волокнистую ткань, которая также анализировалась исследователями как сорбент. Например, Linan Liu и другие в своей работе [18] исследовали применение порошка из плодовой оболочки плодов *Xanthoceras sorbifolia* и их карбонизированной формы при удалении нефти из водной среды. Сорбционная способность составила 0,0751 г/г у сырого материала и 0,0495 г/г у карбонизированного. Gbadegesin Adeyemi и другие [19] исследовали свойства порошка из кожуры плодов *Musa acuminata* при удалении нефти из пластовых вод нефтяных месторождений. Банановая кожура обрабатывалась н-гексаном, промывалась дистиллированной водой, сушилась в течение 12 часов в печи при 100°C, затем измельчалась в ступке до получения частиц диаметром 2–3 мм. Эффективность очистки пластовых вод от нефти составила 98 %. Очистку пластовых вод от сырой нефти в штате Ривер (Нигерия) природными сорбентами растительного происхождения рассмотрели Samson I. Eze и другие в своей работе [20]. Они исследовали шелуху семян *Dialium guineense*, в том числе обработанную сульфатом аммония. Эффективность удаления сырой нефти из загрязненной воды составила более 50 % при pH = 6,1.

Плодовая оболочка зерен *Oryza sativa* как сорбент для удаления моторного масла из водной среды рассмотрена в работе Irfan Hafeez Aminuddin и других [21]. Они исследовали эффективность трех видов сорбента плодовой оболочки зерен риса*:* необработанная, обработанная при температуре 160°C в течение 20 минут в лабораторной печи и в виде биоугля. Наилучшие показатели зафиксированы у обработанной температурой рисовой шелухи — 2,7 ±0,07 г/г и эффективность поглощения масла на уровне 48,95 ±2,69 %.

Характерным морфологическим элементов у плодов *Zea mays* является початок, который возможно использовать в качестве нефтесорбента. Например, Blessing E. Eboibi и другие [22] установили сорбционную способность початков в 12,64 г/г при концентрации нефти в воде на уровне 7,8 г/л. Другие исследователи в своей работе [7] проанализировали способность початков *Zea mays* удалять моторное масло из деминерализованной и природной морской воды. Сорбционная способность составила 6,99–7,56 г/г, эффективность поглощения составила 94,78–98,56 % в морской воде.

Применение кожуры *Ipomoea batatas* для очистки сточных вод от моторного масла рассмотрели Kovo G. Akpomie и другие в своей работе [23]. Сорбционная способность при первом использовании составила 3,39 г/г и 2,82 г/г на четвертом цикле. Зафиксирована 96,2 % десорбция масла при использовании петролейного эфира в качестве элюента. Mohmad Khalel Ibrahim и другие [24] изучали эффективность удаления нефтепродуктов из водной среды семенами *Cassia surattensis*. Наибольшая эффективность зафиксирована при pH 2, 120 минут контакта и 2 г семян и составила 79,4 %; сорбционная способность составила 0,012 г/г.

Форма высших растений — травянистые растения (травы) также анализируются исследователями в качестве нефтесорбентов. Например, Micklare Angelo C. Zepeda и другие [25] изучали сорбционные свойства травы *Miscanthus sinensis* в виде бона с сорбентом для удаления разливов нефтепродуктов. Собранное сырье промывалось проточной водой, нарезалось ножницами и просушивалось при температуре 80°C в течение трех часов. Далее образцы измельчались в электрическом блендере и сортировались на три группы с помощью сита в зависимости от величины частиц: 0,595 мм, 0,841 мм и 2 мм и упаковывались в

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

нейлоновые боны. Наилучшие показатели сорбции по керосину и дизельному топливу достигнуты при размере частиц 0,595 мм, далее по убыванию эффективности шли боны с размером частиц 0,841 мм и 2 мм. Наивысший показатель сорбционной способности достигнут при исследовании ликвидации дизельного топлива и керосина с твердой поверхности — 3,91 г/г и 3,33 г/г соответственно, лучшие показатели при сорбции дизельного топлива и керосина с поверхности воды составили 1,33 г/г и 1 г/г соответственно.

S. Viju и G. Thilavagathi [26] исследовали сорбционную способность травы *Urtica dioica*, обработанной горячей водой. Максимальная сорбционная способность достигнута при обработке водой при температуре 100°C и нахождении сорбента в воде в течение 15 минут — 15,89 г/г и 13,10 г/г для моторного масла и дизельного топлива соответственно. G. Thilagavathi и C. Praba Karan [27] изучали нефтесорбционную способность травы *Urtica dioica* при использовании ее в бонах. Максимальная сорбционная способность материала составила 56 г/г для высокоплотной нефти и 23,9 г/г для дизельного топлива.

Zineb Chaouki и другие [28] сравнивали эффективность применения традиционного сорбента Fibroil и органических сорбентов из трав *Schoenoplectus lacustris* и *Acorus calamus* при удалении дизельного топлива из водной среды. Стебли растений собирались в прибрежной зоне, затем разделялись на сегменты 1,0–1,5 $см^2$ и промывались деионизированной водой. Полученные образцы высушивались при температуре 95°C в течение 24 часов. Сорбционная способность составила 7 г/г, 4,05 г/г и 1,39 г/г для Fibroil, *Schoenoplectus lacustris* и *Acorus calamus*, соответственно.

Amalachukwu Ifeyinwa Obi и другие [29] использовали траву *Pennisetum purpureum* для удаления сырой нефти из водных сред. Исследовались характеристики немодифицированной и модифированной ацетилированием травы. Нефтеемкость немодифицированной травы Напье составила 7,07 г/г, в то время как нефтеемокость модифицированной травы составила 9,057 г/г.

В своей работе [30] Javad Sayyad Amin и другие исследовали адсорбционную способность водного растения *Azolla filiculoides* при удалении моторного масла и сырой нефти. Адсорбционная способность в морской воде при температуре 25°C и pH 8,3 составила 10,2 г/г и 5,3 г/г для моторного масла и сырой нефти соответственно.

Vaidotas Vaisis [31] рассмотрел сорбционные свойства различных модификаций органического сорбента из мха *Rhytidiadelphus triquetrus*, широко распространенного в Бореальных регионах, для сбора дизельного топлива с поверхности воды. При этом сорбент модифицировался несколькими методами: обработка горячей водой при температуре 80°C и 100°C, мерсеризация и покрытие водонефтяным покрытием с концентрацией нефти 10 % и 50 %. Сорбционная способность наиболее эффективных модификаций составила 8,99 г/г при мерсеризации, 8,29 г/г при обработке водой при температуре 80°C и 7,85 г/г при обработке водой при температуре 100°C.

Отдельным видом органических сорбентов растительного происхождения являются опилки, полученные в процессе измельчения дерева и представляющие собой мелкозернистый сыпучий материал. Получение сорбентов из опилок возможно в рамках био-рефайнинга древесины. Например, Siti Nurliyana Che Mohamed Hussein и другие [32] рассматривали применение смешанных опилок, обработанных этанолом, гидроксидом натрия и соляной кислотой, в качестве нефтяного сорбента. В процессе исследования определено влияние времени сорбции, среды (водная или твердая поверхность) на эффективность сорбции. Обработанные кислотой опилки, показали сорбционную способность на уровне 4,82 г/г после 90 минут сорбции и возможность повторного использования сорбента 4 раза. Также определено, что вязкость нефти и температура могут влиять на сорбционную способность: сырая нефть оказалась наиболее поглощаемой вследствие низкой вязкости.

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Результаты и обсуждение

Проанализированные природные сорбенты растительного происхождения с учетом их модификаций и сорбируемого вещества сведены в таблицу по мере уменьшения сорбционной способности.

Таблица

Природные сорбенты растительного происхождения

Сорбент	Сорбируемое вещество	Сорбционная способность, г/г	Ссылка
Волокна плодов *Calotropis procera*, обработанные температурой 200°C	Сырая нефть	124,6–180,95	[15]
Волокна плодов *Calotropis procera*, модифицированные раствором NaOH	Сырая нефть	103,9	[16]
Волокна плодов *Calotropis procera*, обработанные температурой 150°C	Сырая нефть	94,31–103,37	[15]
Волокна плодов *Calotropis procera*, модифицированные гидротермальной обработкой	Сырая нефть	99,2	[16]
Волокна плодов *Calotropis procera*, модифицированные раствором $NaClO_2$	Сырая нефть	92,0	[16]
Волокна плодов *Calotropis Procera*	Сырая нефть	76,32	[15]
Волокна плодов *Populus nigra*	Моторное масло Дизельное топливо	65,85 53,74	[17]
Волокна плодов *Ceiba pentandra*, модифицированные NaOH	Отработанное моторное масло	62,63	[11]
Волокна плодов *Ceiba pentandra*	Дизельное топливо	58,462 ±6,733	[14]
Бон из травы *Urtica dioica*	Нефть высокой плотности Дизельное топливо	56 23,9	[27]
Ватин из необработанных волокон плодов *Gossypium herbaceum*	Моторное масло	50,27	[10]
Волокна плодов *Ceiba pentandra*, покрытые стеаратом кальция	Моторное масло	50	[12]
Волокна плодов *Ceiba pentandra*	Отработанное моторное масло	49,51	[11]
Волокна плодов *Gossypium herbaceum*, модифицированные жирными кислотами C_{18}	Сырая нефть	35,58	[9]
Трава *Urtica dioica*, обработанная горячей водой	Моторное масло Дизельное топливо	15,89 13,1	[26]
Початки *Zea mays*	Сырая нефть	12,64	[22]
Черешки листьев *Phoenix dactylifera*	Моторное масло	12,49–13,56	[7]
Порошок из волокон плодов *Ceiba pentandr*a	Моторное масло Минеральное масло	10,42–10,96 10,18–10,73	[13]
Водное растение *Azolla filiculoides*	Моторное масло Сырая нефть	10,2 5,3	[30]
Трава *Pennisetum purpureum*, модифицированная ацетилированием	Сырая нефть	9,057	[29]
Мерсеризованный мох *Rhytidiadelphus triquetrus*	Дизельное топливо	8,99	[31]
Мох *Rhytidiadelphus triquetrus, обработанный горячей водой (80°*C)	Дизельное топливо	8,29	[31]
Мох *Rhytidiadelphus triquetrus, обработанный горячей водой (100°*C)	Дизельное топливо	7,85	[31]
Трава *Pennisetum purpureum*	Сырая нефть	7,07	[29]
Початки *Zea mays*	Моторное масло	6,99–7,56	[7]
Пустые грозди плодов Elaeis guineensis	Сырая нефть	5,8–5,96	[8]
Смешанные опилки	Сырая нефть	4,82	[32]
Трава *Schoenoplectus lacustris*	Дизельное топливо	4,05	[28]
Кожура *Ipomoea batatas*	Моторное масло	3,39	[23]

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Сорбент	Сорбируемое вещество	Сорбционная способность, г/г	Ссылка
Плодовая оболочка зерен *Oryza sativa*, обработанная при температуре 160°C	Моторное масло	2,7 ±0,07	[21]
Листья *Lawsonia inermis*	Отработанное моторное масло	1,6	[5]
Трава *Acorus calamus*	Дизельное топливо	1,39	[28]
Бон из травы *Miscanthus sinensis*	Дизельное топливо Керосин	1,33 1	[25]
Порошок из листьев *Olea europaea*, модифицированный н-гексаном	Сырая нефть	0,143	[6]
Порошок из плодовой оболочки плодов *Xanthoceras sorbifolia*	Сырая нефть	0,0751	[18]
Карбонизированный порошок из плодовой оболочки плодов *Xanthoceras sorbifolia*	Сырая нефть	0,0495	[18]
Семена *Cassia surattensis*	Сырая нефть	0,012	[24]

Составлено автором

Как видно из таблицы, в качестве сорбента используются различные морфологические части растений. Сорбционная способность нефтесорбентов изменяется от 180,95 до 0,012 г/г. Наибольшую сорбционную способность из рассмотренных видов имеют волокна плодов *Calotropis procera*, обработанные температурой 200°C.

Анализируя полученные результаты видно, что среди рассмотренных растений есть виды, произрастающие также на территории Российской Федерации. К ним относятся *Populus nigra* (тополь черный), *Urtica dioica* (крапива двудомная), *Gossypium herbaceum* (хлопчатник травянистый), *Zea mays* (кукуруза сахарная) и *Oryza sativa* (рис посевной). Тополиный пух при своей сорбционной емкости 53,74–65,85 г/г может составить конкуренцию синтетическим нефтесорбентам, присутствующим на отечественном рынке, таким как Пенопрум (35–50 кг/кг), Униполимер-М (43,67 кг/кг), Пенографит (45–55 кг/кг). Боны, изготовленные из крапивы, эффективны для ликвидации аварийных разливов нефти высокой плотности. Нефтеемкость сорбентов из початков кукурузы сравнима с сорбентом Лессорб-Экстра (10 г/г).

В настоящее время на основе проведенного обзора работ, авторами начаты исследования по оценке сорбционной способности листового опада урбанизированной территории г. Уфа. Скрининговые исследования показали, что листовой опад *Quercus robur* с размерами частиц 5,0 мм имеет нефтеемкость 5,70 г/г, с размерами частиц 2,0 мм — 4,67 г/г; листовой опад *Acer platanoides* с размерами частиц 2,0 мм имеет нефтеемкость 4,77 г/г; а листовой опад *Betula pendula* с размерами частиц 2,0 мм имеет нефтеемкость 4,79 г/г.

Заключение

Рассмотрены природные нефтесорбенты растительного происхождения, описанные в зарубежной научной литературе. Исследователи рассматривают в качестве сорбента отдельные морфологические части растений, такие как листья, черешки листьев, гроздья, плоды, плодовую оболочку, шелуху и т. д., так и травянистые растения полностью. Широко распространенными видами умеренных широт, показавших высокую сорбционную способность, являются *Populus nigra* (тополь черный) и *Urtica dioica* (крапива двудомная). При этом «тополиный пух», наравне с опавшими листьями является растительным отходом урбанизированной территории. Такие виды как *Zea mays* (кукуруза сахарная) и *Oryza sativa* (рис посевной) относятся к сельскохозяйственным культурам и их отходы — початки и шелуха могут быть использованы в получении сорбентов. Использование растительных отходов в получении нового продукта (сорбента) характерно для экономики замкнутого цикла.

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

ЛИТЕРАТУРА

1. Кальсин, Н.А., Насырова, Э.С. Мероприятия по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: материалы IX международной научно–практической конференции. Москва. — 2024. — С. 95–97.
2. Карапетян, К.Г., Дорош, И.В., Собянина, Д.О., Нафикова, Э.В. Применение сорбентов и микоризных грибов для очистки нефтезагрязненных земель // Южно-Сибирский научный вестник. — 2022. — № 4(44). — С. 116–122.
3. Martini, S., Afroze, S. Current development of sorbents derived from plant and animal waste as green solution for treating polluted aqueous media // Jurnal Teknologi. — 2021. — Т. 83. — № 6. — С. 175–191.
4. Zamparas, M., Tzivras, D., Dracopoulos, V., Ioannides, T. Application of sorbents for oil spill cleanup focusing on natural-based modified materials: a review // Molecules. — 2020. — Т. 25(19). — № 4522. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33023166/.
5. Mahmoud, M.A., Tayeb, A.M., Daher, A.M., Bakather, O.Y., Hassan, M., Eldoma M.A., Elsheikh Y.A., Abouatiaa A.F.F. Adsorption study of oil spill cleanup from sea water using natural sorbent // Chemical Data Collections. — 2022. — Т. 41. — № 100896. https://www.researchgate.net/publication/361369464_Adsorption_study_of_oil_spill_cleanup_from_sea_water_using_natural_sorbent.
6. Ibrahim, T., Sabri, M.A., Khamis, M., Elsayed, Y., Sara, Z., Hafez, B. Produced water treatment using olive leave // Desalination and Water Treatment. — 2017. — Т. 60. — С. 129–136.
7. Nechchadi, B., Ghazzaf, H., Mazoir, N., Lhadi, E.K., el Krati, M., Tahiri, S. Oil removal from water through the sorption on natural agrowaste materials // Journal of Environmental Engineering. — 2020. — Т. 146. — № 10. https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001802.
8. Asadpour, R., Yavari, S., Kamyab, H., Veeramuthu, A., Chelliapan, S., Yuzir, A. Study of oil sorption behaviour of esterified oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fibre and its kinetics and isotherm studies // Environmental Technology & Innovation. — 2021. — Т. 22. — № 101397. https://www.researchgate.net/publication/349088888_Study_of_oil_sorption_behaviour_of_esterified_oil_palm_empty_fruit_bunch_OPEFB_fibre_and_its_kinetics_and_isotherm_studies.
9. Yongsoon, S., Kee S.H., Bruce, W.A., George, T.B. Cotton fiber–based sorbents for treating crude oil spills // ACS Omega. — 2020. — Т. 5. — № 23. — С. 13894–13901.
10. Vinitkumar, S., Sudheer J., Kater, H., Siva, P., Ronald, J.K., Seshadri, R. Novel natural sorbent for oil spill cleanup // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2014. — Т. 53. — № 30. — С. 11954–11961.
11. Pannirselvam, S.V., Robert, A.W., Ng, C.H., Abang, S., Yaser, A.Z., Janaun, J. Oil sorption behavior of natural kapok fiber as an alternative to commercial synthetic fiber // Transactions on Science and Technology. — 2021. — Т. 8. — № 3-3. — С. 604–610.
12. Blaquera, A.L.M., Herrera, M.U., Manalo, R.D., Maguyon-Detras, M.C., Futalan, C.C., Balela, M.D.L. Preparation of calcium stearate-coated kapok fibers for oil sorption // Materials Science Forum. — 2022. — Т. 1069. — С. 9–15.

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

13. Xu, Y., Cao, L., Shen, H., Xu, G. Temperature effect on oil sorption and wettability of kapok fiber // Journal of Natural Fibers. — 2022. — Т. 19. — № 7. — С. 2555–2566. DOI: 10.1080/15440478.2020.1820931.

14. Oliveira, Le., Oliveira, La., Sonsin, A., Duarte, J., Soletti, J., Fonseca, E., Ribeiro, L., Meili, L. Ultrafast diesel oil spill removal by fibers from silk-cotton tree: characterization and sorption potential evaluation // Journal of Cleaner Production. — 2020. — Т. 263. — № 121448. https://www.researchgate.net/publication/340467133_Ultrafast_diesel_oil_spill_removal_by_fibers_from_silk-cotton_tree_Characterization_and_sorption_potential_evaluation.

15. Hilário, L.S., Anjos, R.B., Borges, de M.J.H., Silva, D.R. Evaluation of thermally treated Calotropis procera fiber for the removal of crude oil on the water surface // Materials (Basel). — 2019. — Т. 12. — № 23:3894. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31775373/.

16. Anjos, R.B., Hilário, L.S., Borges, de M.J.H., Silva, D.R. Crude oil removal using Calotropis procera // Bioresources. — 2020. — Т. 15. — № 3. — С. 5246–5263.

17. Xu, Y., Su, Q., Shen, H., Xu, G. Physicochemical and sorption characteristics of poplar seed fiber as a natural oil sorbent // Textile Research Journal. — 2019. — Т. 89. — № 19-20. — С. 4186–4194.

18. Liu, L., Wang, L., Song, W., Yang, L., Liming, Y., Xia, S., Wang, H., Strong, J. Crude oil removal from aqueous solution using raw and carbonized Xanthoceras sorbifolia shells // Environmental Science and Pollution Research. — 2018. — Т. 25. — С. 29325–29334.

19. Adeyemi, G., Fadairo, A., Ling, K., Rasouli, V., Ogunkunle, T., Ayoo, J., Olowy, A. Evaluating the performance of natural organic sorbent for produced water treatment // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria. SPE-212021-MS.

20. Eze, S.I., Akpomie, K.G., Ezeofor, C.C., Mmadubuike, N.V., Ojo, F.K. Remediation of oil spill polluted water from Niger Delta Nigeria by sorption onto ammonium sulfate modified Dialium guineense seed husk // Petroleum Science and Technology. — 2019. — Т. 37. — № 15. — С. 1830–1838.

21. Aminuddin, I.H., Taufik, S.H., Puasa, N.A., Radziff, S.B.M., Zamree, N.D., Shaharudddin, N.A., Che Abdullah, C.A., Rahman, M.F., Azmi, A.A., Ahmad, S.A. Biosorption of engine oil using rice husk in a filtration system // System. Sustainability. — 2023. — Т. 15. — № 14599.

22. Eboibi B., Ogbue M., Udochukwu E.E.C., Umukoro, J., Okan, L., Agarry, S. Maize cob (Zea mays) as natural biomass sorbent for crude oil biosorptive removal from contaminated seawater: Taguchi process optimization and biosorptive removal mechanism // Environmental Monitoring and Assessment. — 2023. — Т. 195. — № 1145.

23. Akpomie K.G., Conradie J. Treatment of motor oil–contaminated water via sorption onto natural organic lignocellulosic waste: thermodynamics, kinetics, isotherm, recycling, and reuse // Biomass Conversion and Biorefinery. — 2023. — Т. 13. — С. 10285–10297.

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

24. Khalel, M., Abd, A., Hassan, A. A., Samir, A. Utilisation of Cassia surattensis seeds as natural adsorbent for oil content removal in oilfield produced water // Science & Technology. — 2019. — Т. 27. — № 4. — С. 2123–2138.

25. Zepeda, M., Balsomo, E. Miscanthus sinensis (silver grass) fiber as a component of an eco-friendly sorbent bag for oil spill clean–up // International Journal of High School Research. — 2020. — Т. 2. — С. 16–20.

26. Viju, S., Thilagavathi, G. Hot water treatment on nettle fibers: an environment–friendly/economical process for the production of oil sorbent // Journal of Natural Fibers. — 2022. — Т. 19. — № 2. — С. 761–769.

27. Thilagavathi, G., Karan, C. Investigations on oil sorption capacity of nettle fibrous assembly and 100 % nettle and nettle/kapok blended needle–punched nonwovens // Journal of Industrial Textiles. — 2019. — Т. 49. — № 4. — С. 415–430.

28. Chaouki, Z., Nawdali, M., Hicham, Z., Oil removal from refinery wastewater through adsorption on low cost natural biosorbents // Environmental Engineering and Management Journal. — 2020. — Т. 19. — № 1. — С. 105–112.

29. Obi, A.I., Ajiwe, V.I., Okonkwo, C P. Equilibrium and kinetic studies of crude oil sorption on unmodified and modified Napier grass // Makara Journal of Science. — 2023. — Т. 27. — С. 115–128.

30. Javad, S.A., Majid, V.A., Sohrab, Z. Natural sorbent for oil spill cleanup from water surface: environmental implication // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2015. — Т. 54. — № 43. — С. 10615–10621.

31. Vaišis, V., Anužytė, E., Paliulis, D., Bradulienė, J. Modification of natural oil sorbent for improvement of hydrophobicity // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. — 2022. — Т. 30. — № 1. — С. 226–233.

32. Che Mohamed Hussein, S., Othman, N., Dollah, A., Che Abdul Rahim, A., Japperi, N., Ramakrishnan, N. Study of acid treated mixed sawdust as natural oil sorbent for oil spill // Materials Today: Proceedings. — 2019. — Т. 19(4). — С. 1382–1389.

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Kalsin Nikita Alexandrovich
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: kalsin.nikita@bk.ru

Nasyrova Elina Sagitovna
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: nasyrova.es@ugatu.su
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=623024

Bondar Kristina Evgenievna
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: bondar.ke@ugatu.su
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=778636

Nafikova Elvira Valerikovna
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: nafikova.ev@ugatu.su
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=715619

Natural plant oil sorbents of plant origin and their effectiveness (review of foreign works)

Abstract. Various methods and means are used to eliminate emergency oil spills; one of such means is sorbents, which are divided into: synthetic, inorganic and organic. Plants are widely used to produce organic sorbents. Foreign researchers in their works analyses the sorption capacity of various morphological parts of plants, including modifying them by various methods: hydrothermal and heat treatment, acetylation, usage of $NaClO_2$ and NAOH solutions, calcium stearate and fatty acids. In the analyzed works Calotropis procera fruits treated at 200°C showed the highest oil capacity (124,6–180,95 g/g), followed by fibres of Populus nigra, Ceiba pentandra and Gossypium herbaceum fruits. Among the plants considered by foreign researchers there are growing on the territory of Russian Federation. These include Populus nigra (poplar), Urtica dioica (nettle), Gossypium herbaceum (cotton), Zea mays (maize) and Oryza sativa (rice). «Poplar fluff», as well as fallen leaves, is plant waste of an urbanized area, while Zea mays cobs and Oryza sativa husks are classified as agricultural waste. The use of plant waste in the production of a new product (sorbent) belongs to the circular economy. Screening studies conducted by the authors showed that the fallen leaves of Quercus robur with a particle size of 5,0 mm has an oil capacity of 5,70 g/g, with a particle size of 2,0 mm — 4,67 g/g; the fallen leaves of Acer platanoides with a particle size of 2,0 mm has an oil capacity of 4,77 g/g; and the fallen leaves of Betula pendula with particle sizes 2,0 mm has an oil capacity of 4,79 g/g.

Keywords: oil spill; natural sorbent; sorption capacity; Calotropis procera fiber; Populus nigra fiber; Urtica dioica grass; circular economy

44NZVN224
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com