



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 628.358-032.25:363

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.29



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЕЛУХИ ПШЕНИЦЫ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Амина Шамильевна Хисамова ¹, Светлана Владимировна Степанова ²,
Анна Александровна Алексеева ³

^{1, 2, 3} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

¹ aminalatipova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2755-6753>

² ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

³ annank90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6119-1934>

Аннотация. Добыча и переработка нефти сопровождаются значительными рисками для окружающей среды, включая разливы нефти, которые приводят к загрязнению водных объектов и почвы. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки экологически безопасных и экономически эффективных методов ликвидации нефтяных загрязнений. Целью работы являлось исследование эффективности использования шелухи пшеницы в качестве сорбционного материала для ликвидации разлитой нефти. Для улучшения сорбционных свойств природный полимер был модифицирован 1 %-ным раствором серной кислоты.

В ходе исследования изучены сорбционные характеристики нативных и модифицированных образцов шелухи пшеницы. Установлено, что обработка серной кислотой увеличивает удельную поверхность материала с $5,8 \pm 2,8$ до $8,0 \pm 1,5$ м²/г и объем пор с $1,52 \pm 0,1$ до $2,76 \pm 0,1$ см³/г. Сорбционная емкость модифицированной шелухи пшеницы составила 6,35 г/г, что на 20 % выше, чем у нативных образцов (5,23 г/г). При удалении нефтяной пленки с поверхности воды модифицированный биополимер показал эффективность 99,31 %, тогда как нативный — 96,96 %.

Эксперименты по фитотоксичности показали, что очищенная модифицированными образцами вода имеет индекс токсичности 0,1, что ниже, чем у загрязненной воды (0,2). Также исследована возможность применения биополимера для очистки почвы от нефтяных загрязнений. Установлено, что использование сорбента снижает испарение легких фракций нефти на 50 % и уменьшает негативное влияние на рост растений.

Полученные результаты демонстрируют, что применение шелухи пшеницы в качестве сорбента не только эффективно решает проблему нефтяных загрязнений, но и способствует утилизации сельскохозяйственных отходов, что соответствует принципам циркулярной экономики и устойчивого развития.

Ключевые слова: нефтеразливы, нефтепродукты, отходы сельскохозяйственной промышленности, биополимер, фитотоксичность.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Хисамова А. Ш., Степанова С. В., Алексеева А. А. Использование шелухи пшеницы в качестве природного сорбционного материала для ликвидации разливов нефти // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 187–192. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.029. EDN: <https://elibrary.ru/LGVFAO>.

Original article

USE OF WHEAT HUSK AS A NATURAL SORPTION MATERIAL FOR OIL SPILL RESPONSE

Amina Sh. Khisamova ¹, Svetlana V. Stepanova ², Anna A. Alekseeva ³

^{1, 2, 3} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ aminalatipova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-2755-6753>

² ssvkan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-313X>

³ annank90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6119-1934>

Abstract. Oil extraction and refining are accompanied by significant environmental risks, including oil spills that lead to pollution of water bodies and soil. The relevance of the research is determined by the need to develop environmentally safe and cost-effective methods of oil pollution elimination. The aim of the work was to study the effectiveness of wheat husk as a sorption material for the elimination of spilled oil. To improve the sorption properties, the natural polymer was modified with 1 % sulphuric acid solution.

Sorption characteristics of native and modified samples of wheat husk were studied. It was found that treatment with

© Хисамова А. Ш., Степанова С. В., Алексеева А. А., 2025

sulfuric acid increases the specific surface area of the material from 5.8 ± 2.8 to 8.0 ± 1.5 m²/g and pore volume from 1.52 ± 0.1 to 2.76 ± 0.1 cm³/g. The sorption capacity of modified wheat husk was 6.35 g/g, which was 20 % higher than that of native samples (5.23 g/g). In removing oil film from the water surface, the modified SW showed an efficiency of 99.31 %, whereas the native showed an efficiency of 96.96 %.

Experiments on phytotoxicity showed that water treated with modified wheat husk had a toxicity index of 0.1, which is lower than that of polluted water (0.2). The possibility of wheat husk application for soil purification from oil pollution was also investigated. It was found that the use of sorbent reduces the evaporation of light fractions of oil by 50 % and reduces the negative impact on plant growth.

The obtained results demonstrate that the use of wheat husk as a sorbent not only effectively solves the problem of oil pollution, but also contributes to the utilization of agricultural waste, which corresponds to the principles of circular economy and sustainable development.

Keywords: oil spills, oil products, agricultural waste, wheat husks, phytotoxicity.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Khisamova, A.Sh., Stepanova, S.V., Alekseeva, A.A. (2025). Use of wheat husk as a natural sorption material for oil spill response. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 187-192. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.029. EDN: https://elibrary.ru/LGVFAO.

ВВЕДЕНИЕ

Добыча ископаемого топлива (уголь, нефть, металлы) сопровождается загрязнением окружающей среды. Нефтедобыча, транспортировка и переработка несут риски для водных источников, даже при соблюдении экологических норм. Загрязнение нефтью водных объектов, вызванное разливами (человеческий фактор до 50 %) [1], утечками или транспортировкой (неисправности оборудования до 40 %), наносит вред экосистемам, дикой природе и здоровью человека из-за содержания токсичных веществ, таких как углеводороды, тяжелые металлы и химикаты.

Попадая в водный объект нефть образует плёнку на поверхности воды, препятствующую процессу фотосинтеза растений, что приводит к деградации и гибели экосистем [2].

Для минимизирования негативного воздействия нефти на окружающую среду необходимо применять оперативные и эффективные меры реагирования, такие как локализация нефтяного пятна с последующей очисткой воды и почв [3]. Основные методы очистки воды от нефтепродуктов включают в себя: механическую (сбор, фильтрация, сорбция), биологическую (микроорганизмы, растения), физико-химическую (флотация, коагуляция) и термическую (сжигание) обработку [4].

Один из наиболее распространенных и эффективных методов — это применение сорбентов, которые обладают способностью притягивать и адсорбировать нефтяные загрязнения, образуя агрегаты, которые затем можно легко удалить. В качестве сорбентов для удаления нефти используются различные материалы и вещества от искусственных специализированных материалов до органических отходов, например, сельского хозяйства [5,6].

Сорбенты на основе отходов злаковых культур являются эффективным и экологически безопасным вариантом для удаления пленок нефти на водной поверхности [7]. Отходы злаковых культур, такие как солома, семена и оболочки, шрот и другие растительные материалы, в основе которых лежат природные полимеры, имеют высокую абсорбционную способность, что позволяет им эффективно взаимодействовать с нефтяными загрязнениями [8, 9].

Применение природных полимеров в качестве сорбентов для удаления пленок нефти позволяет решить геоэкологическую проблему — образования отходов, а именно, утилизации растительных отходов для экологизации сельскохозяйственной отрасли, а также очистки вод и почв [10, 11].

Целью данной работы является исследование применения природного полимера (шелухи пшеницы) в качестве сорбционного материала (СМ) для ликвидации разливов нефти как с водной поверхности, так и с почвы.

МЕТОДЫ

Исходный продукт — шелуха пшеницы (ШП), ежегодно в значительных объемах складывается на предприятиях по переработке зерна в качестве отхода и легкодоступна.

Изменение структуры биополимера при модификации исследовалось с помощью атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии.

Определение сорбционной емкости материала при различной концентрации нефти в воде.

Эксперимент по проведению сорбции нефти проводился в соответствии с [12].

Водопоглощение СМ показывает какая масса воды, поглощается нефтесорбентом при нормальных условиях. Эксперимент по определению водопоглощения проводился по методике, представленной в [13].

Суммарную сорбционную емкость СМ определяли в зависимости от объема нефти и времени воздействия СМ на загрязненный участок водной поверхности [12].

Содержание нефти, оставшейся в воде после сорбции, определялось методом экстракции проводилось в соответствии с ПНД Ф 1:2.4.168, ПНД Ф 14.1:2.116.

Модификация образцов проводилась следующим образом: отобранную пробу образца ШП, массой 1 г, помещали в колбу и добавляли 100 мл 1%-ый раствор серной кислоты. Содержимое перемешивали, в течение 60 минут, на электрической мешалке со скоростью 3000 об/мин, после чего отфильтровывали и высушивали СМ до постоянной массы.

При определении фитотоксичности объектом исследования являлась загрязненная нефтью вода (17 г/л) и модельная вода, очищенная от нефти, ШП, модифицированной 1 % раствором серной кислоты. Предметом исследования являлась всхожесть растительных тест-объектов: кресс-салат (*Lepidium sativum* L.); редис (*Raphanus sativus* L.).

На дно чашек Петри помещали бумажные фильтры, которые увлажняли водой, очищенной от нефти модифицированным СМ, и равномерно распределяли зерна тест-культур кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и редиса (*Raphanus sativus* L.) в соответствии с требованиями технических условий определения всхожести семян в соответствии с ГОСТ 12038-84 (рис. 1).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЛУХИ ПШЕНИЦЫ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Индекс токсичности определяется по формуле:

$$J = \frac{b_{\text{контроль}} - b_{\text{опыт}}}{b_{\text{контроль}}} \quad (1)$$

где J – индекс токсичности, $b_{\text{контроль}}$ – всхожесть семян в контроле, $b_{\text{опыт}}$ – всхожесть семян в опытном варианте.

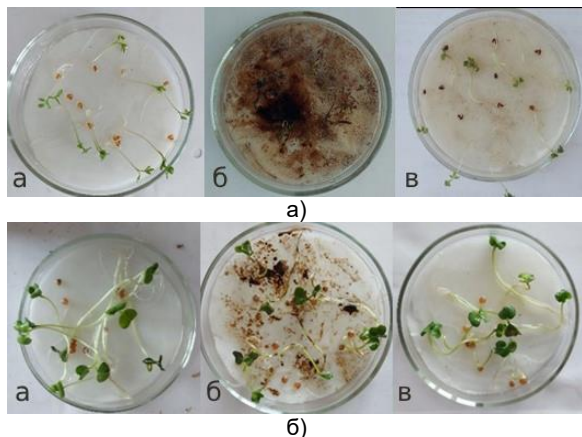


Рисунок 1 – Всхожесть растительных тест-объектов кресс – салат (А) и редис (Б) а) дистиллированная вода (контроль); б) модельная вода; в) модельная вода, очищенная шелухой пшеницы

Figure 1 - Germination of plant test objects cress - lettuce (A) and radish (B) a) distilled water (control); b) model water; c) model water purified with wheat husk

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование нативных т.е. немодифицированных образцов ШП для удаления нефтяных пленок с поверхности воды может привести к вторичному загрязнению очищенных вод из-за наличия в ней примесей, которые вымываются при контакте с водой и увеличивают цветность и мутность (песок, пыль и др. взвешенные вещества). С целью недопущения повторного загрязнения воды, а также улучшения технологических характеристик сорбентов проводили модификацию нативных образцов ШП 1% раствором H_2SO_4 .

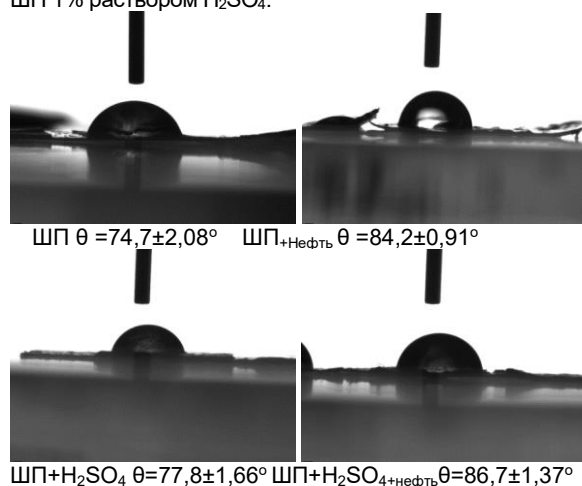


Рисунок 2 – Изображения краевого угла смачивания кислотомодифицированных образцов ШП

Figure 2 – Images of the contact angle of acid-modified wheat husk samples

При обработке растительных отходов слабыми кислотными растворами происходит расширение целлюлозы, в то же время происходит сокращение массы сырья до 20 % из-за высвобождения порового пространства от водорастворимых веществ. Следовательно, увеличивается внутренняя поверхность СМ.

У полученных модифицированных образцов ШП исследовалось влияние раствора 1% H_2SO_4 на структуру и свойства материала.

Поверхностное натяжение — это ключевой параметр, определяющий способность удерживать поглощаемое вещество на границе раздела, в данном случае на границе СМ: водой, является мерой силы взаимодействия. Краевой угол смачивания (θ) представляет собой угол, который образуется между поверхностью СМ и поверхностью воды при их контакте. Чем больше гидрофильность вещества, тем ниже краевой угол смачивания θ . Значение краевого угла смачивания на исходном и модифицированном СМ показаны на рис. 2).

Анализ рис.2 указывает на то, что обработка ШП слабым раствором H_2SO_4 улучшает сорбционные свойства материала по отношению к нефти. Это происходит за счет образования пленок нефти на поверхности материала, что повышает его адгезию к нефти. Уменьшение гидрофобности отрицательно сказывается на плавучести материала, она уменьшается, что может привести к оседанию агломератов на дно водоемов.

Обработка раствором серной кислоты, помимо прочего, влияет на поверхность биополимера. По микроскопическим фотографиям, представленным на рис. 3 и 4 можно наблюдать разволокнение образцов и целлюлозы входящей в ее состав. Высота фрагментов ШП после модификации увеличивается в 2-3 раза (с 50-100 нм у ШП до 200-300 нм у модифицированного ШП). Очевидно, что данные факты способствуют увеличению удельной поверхности.

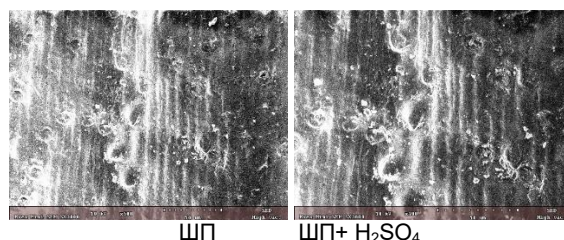


Рисунок 3 – Изображение АСМ поверхности образцов ШП (увеличение в 700 раз)

Figure 3 – Image of the surface of wheat husk samples with an atomic force microscope (700 times magnification)

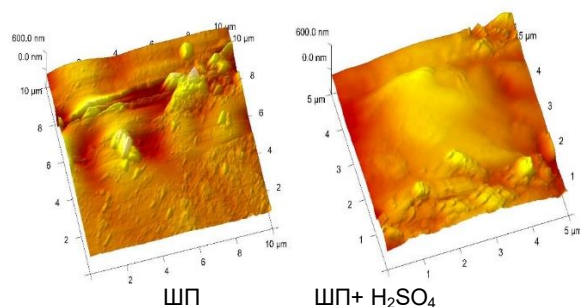


Рисунок 4– Изображение СЭМ поверхности образцов ШП

Figure 4 – Scanning electron microscope image of the surface of wheat husk samples

Далее были проанализированы стандартные сорбционные характеристики нативных и модифицированных образцов ШП, которые показали увеличение суммарного объема пор с $1,52 \pm 0,1$ до $2,76 \pm 0,1$ см³/г и удельной поверхности с $5,8 \pm 2,8$ до $8,0 \pm 1,5$ м²/г для образцов, обработанных 1 %-ным раствором H₂SO₄, следовательно, данная модификация приводит к разрушению связей в структуре целлюлозы. Очевидно, что обработка оказывает положительный эффект на сорбционные свойства материала и препятствует вторичному загрязнению нефти.

Сравнительный анализ полученных результатов сорбционной емкости в отношении девонской нефти в статических условиях для исследованных сорбентов на основе ШП показал, что сорбционная емкость ШП, модифицированной серной кислотой (6,35 г/г) на 20 % выше сорбционной емкости нативных образцов (5,23 г/г).

Любой сорбционный материал должен соответствовать основным критериям:

- количество поглощенной нефти на единицу веса сорбента т.е. нефтеемкость;
- способность сорбента не впитывать воду т.е. гидрофобность;
- удобство нанесения СМ на поверхность и его удаление т.е. технологичность;
- доступная стоимость [14].

Таким образом, эффективность использования нефтесорбирующих материалов определяется комплексом данных показателей и их оптимальным соотношением.

Образец ШП, модифицированный раствором серной кислоты, показал значение водопоглощения – 2,08 г/г, а нативный – 1,8 г/г. Увеличение водопоглощения модифицированного образца может быть связано с вымыванием загрязнений из пор СМ при обработке раствором [15].

Для имитации аварийного разлива нефти на поверхности воды использовалась нефть девонского происхождения. При обработке полученных результатов установили зависимости суммарной сорбционной емкости ШП от объема нефтяного пятна.

Суммарная сорбционная емкость также определена для каждого образца в зависимости от времени воздействия. Использовали девонскую нефть объемом 5 см³. Результаты представлены на рисунке 5

Проанализировав рисунок 5 определено, что при удалении нефтяной пленки с поверхности воды в зависимости от объема разлива нефти и времени воздействия наибольшую эффективность имеет сорбционный материал, обработанный слабым раствором серной кислоты.

С увеличением объема нефтяного пятна суммарная сорбционная емкость материалов возрастает. Сорбированная масса воды и нефти составляет: для ШП+ H₂SO₄ – 10,96 г/г, для ШП – 4,26 г/г. Максимальная сорбционная емкость достигается при проведении эксперимента в течение 7 суток.

После удаления пленок нефти с поверхности воды СМ из ШП методом экстракции определили остаточное содержание нефти в воде. Наибольший процент сорбции достигается при использовании модифицированного сорбционного материала, при объеме загрязняющего вещества 10 см³.

Полученные данные показали, что образцы ШП+ H₂SO₄ удаляют пленку нефти с поверхности воды лучше (99,31 %), чем не модифицированная (96,96 %).

Для определения токсического влияния загряз-

ненных и очищенных вод от пленок нефти СМ на основе ШП использовался метод фитотоксичности.

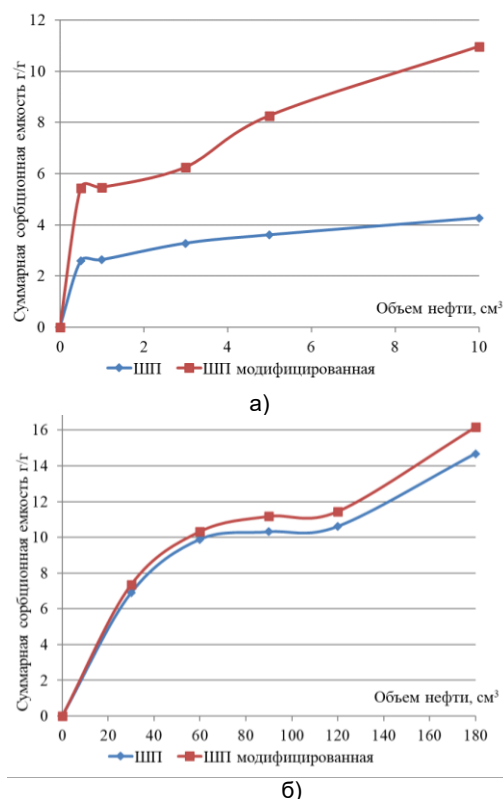


Рисунок 5– Зависимость суммарной сорбционной емкости сорбционного материала от объема нефтяного пятна (А) и от времени контактирования (Б)

Figure 5 – Dependence of the total sorption capacity of the sorption material on the volume of the oil slick (A) and on the contact time (B)

Токсичность — ключевой показатель экологической безопасности и эффективности очистки. Для оценки токсичности вод используют биологические тест-объекты: растения и низшие организмы. Уровень токсичности определяется по реакциям жизнедеятельности: у организмов — размножение, подвижность, дыхание; у растений — всхожесть, скорость роста и морфология. Количественно токсичность выражается индексом токсичности. В результате получилось, что наибольший показатель индекса токсичности во всех экспериментах прослеживается при поливе тест-объектов загрязненной модельной водой 0,2. Применение модифицированной ШП в качестве СМ снизило индекс токсичности для семян редиса и кресс-салата до 0,1 (табл. 1).

Также оценивалась возможность применения СМ на основе ШП для сбора разлитой нефти с поверхности почвы серьезно пострадать от токсичных компонентов, входящих в состав нефти, которые могут оказать стрессовое воздействие на культуры после нефтеразлива. Для уменьшения концентрации нефти в почве распространенным методом является использование СМ.

Первоначально определена максимальная способность данных материалов поглощать нефть на поверхности почвы (табл. 2).

С целью исследования влияния нефти на рост и развитие растений в почвенном слое, где был произведен разлив с последующей ликвидацией нефтяного пятна с использованием ШП была измерена фитотоксичность.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШЛУХИ ПШЕНИЦЫ В КАЧЕСТВЕ ПРИРОДНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ РАЗЛИВОВ НЕФТИ

Таблица 1 – Результаты всхожести семян, количество проросших семян

Table 1 – Seed germination results, number of germinated seeds

Растительный тест-объект	Дистиллированная вода (контроль)		Модельная вода		Очищенная модельная вода	
	через 7 дней после посадки	через 14 дней после посадки	через 7 дней после посадки	через 14 дней после посадки	через 7 дней после посадки	через 14 дней после посадки
Кресс-салат	10	10	8	4	9	9
Редис	10	10	8	8	9	9

Таблица 2 – Результаты всхожести семян, количество проросших семян

Table 2 – Seed germination results, number of germinated seeds

Вид СМ/ Объем нефти см ³	5	10	15	20	25	30
ШП+ H ₂ SO ₄	1,02	1,1	1,33	2,6	3,38	4,64
ШП	0,59	0,78	1,38	1,4	3,3	4,54

В качестве тест-объектов исследовались образцы высших растений: зерна пшеницы (*Triticum aestivum*), овса (*Avena sativa*), ячменя (*Hordeum vulgare*) и горчицы (*Brassica juncea*).

По экспериментальным и расчетным данным энергия прорастания семян культур составила 60 %, 32 %, 48 %, 88 % для пшеницы, овса, ячменя и горчицы соответственно.

Из результатов экспериментов можно сделать вывод, что нефтяное загрязнение негативно влияет на рост растений, приводя к подавлению их надземных частей. Мы наблюдали уменьшение высоты стебля у высших растений на 27 % без применения сорбционного материала и на 13 % после его использования для устранения разлива нефти на почве.

Помимо того, что нефть загрязняет почву и приводит к регрессу в росте растений, легкие фракции нефти испаряются в атмосферу, что также негативно сказывается на качестве окружающей среды.

Использование СМ на основе биополимеров может быть эффективным методом снижения испарения нефти после разлива на почве, т.к. по экспериментальным данным показано снижение испарения на 50 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведены эксперименты целесообразности применения отходов злаковых культур в виде шелухи пшеницы при ликвидации разливов нефти на поверхности воды и почв. Для улучшения сорбционных свойств, предложенный сорбционный материал модифицирован 1- % серной кислотой.

Обработка полимерного природного СМ серной кислотой показала более эффективные результаты по сравнению с нативными образцами ШП, это связано с тем, что в результате воздействия серной кислоты на целлюлозосодержащий материал из него удаляются физические, химические и механические примеси, освобождается поровое пространство и увеличивается селективность поверхности ШП по отношению к нефти.

В соответствии с современными экологическими требованиями в организациях, которые занимаются добычей и переработкой нефти должна быть регламентирована работа по составлению и применению плана действий при возникновении аварийной ситуации (в соответствии с ИТС № 28-2021). Такой план может быть разработан для определенной производственной площадки или для нефтедобывающего предприятия в целом и должен включать проведение практических тренировок по ликвидации и локализации аварийных разливов нефти. Согласно полученным данным, применение СМ на основе ШП позволяет не

только удалить пленку нефти с поверхности воды, снизить токсичность вод, но и может являться частью плана действий при возникновении аварийной ситуации, что в свою очередь обеспечивает реализацию наилучших доступных технологии по добыче нефти.

Таким образом, применение таких отходов сельскохозяйственной продукции как ШП в качестве сорбентов позволяет не только сократить количество отходов и снизить негативное воздействие на окружающую среду, но также создать возможности для вторичного использования и переработки сельскохозяйственных материалов. Этот подход способствует развитию циркулярной экономики и устойчивому использованию природных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Michel J., Fingas M. World Scientific Series in Current Energy Issues / Fossil Fuels. Chapter 7: Oil Spills: Causes, Consequences, Prevention, and Countermeasures. 2016. pp. 159-201. DOI: 10.1142/9789814699983_0007
2. Бурматова О. П. Регионы Сибири с напряженной экологической ситуацией: причины и решения // Развитие территорий. 2023. № 4 (34). С. 28-39. DOI: 10.32324/2412-8945-2023-4-28-39.
3. Cheremisinoff, N. P., Davletshin, A. Emergency Response Management of Offshore Oil Spills: Guidelines for Emergency Responders. Germany: Wiley. 2020 p. 261
4. Исмагилова Р. С. Обзор работ, посвященных методам и способам очистки сточных вод от нефтепродуктов // Modern Science. 2020. № 12-5. С. 376-381.
5. Alekseeva, A.A. Stepanova, S.V. Effect of Plasma Surface Modification of Mixed Leaf Litter on the Mechanism of Oil Film Removal from Water Bodies. Russian Journal of General Chemistry, 2019, 89(13), pp 2763-2768 / DOI: 10.1134/S107036321913005X
6. Тунакова Ю. А., Валиев В. С., Габдрахманова Г. Н. Использование природного цеолита для очистки вод // Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 179–185. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.021
7. Stepanova, S & Alekseeva, A & Khafizova, L. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 791, pp.73 – 83. DOI:10.1088/1757-899X/791/1/012076
8. Jonoobi, M.; Mekonnen, T.H. Adsorption of oil by 3-(triethoxysilyl) propyl isocyanate-modified cellulose nanocrystals. Processes. 2022, p. 2154. DOI: 10.3390/pr10102154.
9. Тюляев В. С., Васильева Ж. В. Исследование эффективности применения органических сорбентов нефти и нефтепродуктов при ликвидации аварийных разливов в морях арктического региона // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 2. С. 125–136.

10. Loh, J.W.; Goh, X.Y.; Phuc, T.T.N.; Quoc, B.T.; Ong, Z.Y.; Hai, M.D. Advanced aerogels from wool waste fibers for oil spill cleaning applications. *J. Polym. Environ.* 2021, pp. 681–694. DOI: 10.1007/s10924-021-02234-y.
11. Bazargan, A., Tan, J., Hui, C. W., & McKay, G. Utilization of rice husks for the production of oil sorbent materials. *Cellulose*, 21(3), 2014, pp. 1679–1688. DOI:10.1007/s10570-014-0203-9.
12. Хисамова, А. Ш. Способ ликвидации аварийных разливов нефти на поверхности воды отходами сельского хозяйства / А. Ш. Хисамова, С. В. Степанова, А. А. Алексеева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13, № 4(68). С. 217–223.
13. Stepanova, S. V. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface / S. V. Stepanova, A. A. Alekseeva, L. Y. Khafizova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod, 31 октября – 01 2019 года. Vol. 791. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012076.
14. Trinh Trong, Nguyen & Loc, Nguyen & Huy, Ba & Thai, Van. Efficient oil removal from water using carbonized rambutan peel: Isotherm and kinetic studies. *Vietnam Journal of Hydrometeorology*. 3, 2023, pp. 1-18. DOI: 10.36335/VNJHM.2023(17).1-18.
15. Золотов Ю.А., Цизин Г.И., Моросанова Е.И., Дмитриенко С.Г. Сорбционное концентрирование микрокомпонентов для целей химического анализа // Успехи химии. 2005. Т.74, № 1. С. 41-66.

Информация об авторах

А. Ш. Хисамова, аспирант кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

С. В. Степанова, д. т. н., доцент кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

А. А. Алексеева, к. т. н., доцент кафедры «Инженерная экология» Казанского национального исследовательского технологического университета.

REFERENCES

1. Michel J., Fingas M. World Scientific Series in Current Energy Issues / *Fossil Fuels. Chapter 7: Oil Spills: Causes, Consequences, Prevention, and Countermeasures*. 2016. pp. 159-201. DOI: 10.1142/9789814699983_00072.
2. Burmatova O. P. (2023). Siberian regions with a tense environmental situation: causes and solutions // *Development of territories*, (4-34), 28-39. (In Russ). DOI: 10.32324/2412-8945-2023-4-28-39.
3. Cheremisinoff, N. P., Davletshin, A. Emergency Response Management of Offshore Oil Spills: Guidelines for Emergency Responders. Germany: Wiley. 2020 p. 261
4. Ismagilova R. S. (2020). Review of works devoted to methods and ways of wastewater treatment from oil products // *Modern Science*, (12-5), 376-381. (In Russ).
5. Alekseeva, A.A. Stepanova, S.V. Effect of Plasma Surface Modification of Mixed Leaf Litter on the Mechanism of Oil Film Removal from Water Bodies. *Russian Journal of General Chemistry*, 2019, 89(13), pp 2763-2768 / DOI:

10.1134/S107036321913005X

6. Tunakova Y. A., Valiev V. V. S., Gabdrakhmanova G. N. (2024). Use of natural zeolite for water purification // *Polzunovskiy vestnik*, (1), 179-185. (In Russ DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.021.).
7. Stepanova, S & Alekseeva, A & Khafizova, L. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 791. pp.73 – 83. DOI:10.1088/1757-899X/791/1/012076
8. Jonoobi, M.; Mekonnen, T.H. Adsorption of oil by 3–(triethoxysilyl) propyl isocyanate–modified cellulose nanocrystals. *Processes*. 2022, p. 2154. DOI: 10.3390/pr10102154.
9. Tyulyaev V. S., Vasilieva Zh. V. (2021). Investigation of the efficiency of the use of organic sorbents of oil and oil products in emergency spill response in the seas of the Arctic region // *Socio-economic and technical systems: research, design, optimization*, (2), 125-136. (In Russ).
10. Loh, J.W.; Goh, X.Y.; Phuc, T.T.N.; Quoc, B.T.; Ong, Z.Y.; Hai, M.D. Advanced aerogels from wool waste fibers for oil spill cleaning applications. *J. Polym. Environ.* 2021, pp. 681–694. DOI: 10.1007/s10924-021-02234-y.
11. Bazargan, A., Tan, J., Hui, C. W., & McKay, G. Utilization of rice husks for the production of oil sorbent materials. *Cellulose*, 21(3), 2014, pp. 1679–1688. DOI:10.1007/s10570-014-0203-9.
12. Khisamova, A. Sh. Stepanova S. V., Alekseeva A.A. Method of liquidation of emergency oil spills on the water surface by agricultural wastes *XXI century: results of the past and problems of the present plus*, (4-68), 217-223. (In Russ).
13. Stepanova, S. V. Alekseeva, A. A., Khafizova L. Y. Technological recommendations for the use of leaf litter based adsorption material to remove an oil slick from water bodies surface, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019, Belgorod*, Vol. 791. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012076.
14. Trinh Trong, Nguyen & Loc, Nguyen & Huy, Ba & Thai, Van. Efficient oil removal from water using carbonized rambutan peel: Isotherm and kinetic studies. *Vietnam Journal of Hydrometeorology*. 3, 2023, pp. 1-18. DOI: 10.36335/VNJHM.2023(17).1-18.
15. Zolotov Yu.A., Tsizin G.I., Morosanov E.I., Dmitrienko S.G. (2025) Sorption concentration of microcomponents for chemical analysis. *Uspekhi khimii*, (1), 41-66. (In Russ).

Information about the authors

A. Sh. Khisamova, postgraduate student of the Department of «Engineering Ecology» of the Kazan National Research Technological University.

S. V. Stepanova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Engineering Ecology» of the Kazan National Research Technological University.

A. A. Alekseeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Engineering Ecology» of the Kazan National Research Technological University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.