

УДК 658.567.1
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941
Шифр специальности ВАК: 1.6.21
Научная статья

Модифицированный нефтесорбент из свекловичного жома для очистки поверхностной воды от нефти

А.С. Мельникова[✉], Н.В. Кострюкова

Уфимский университет науки и технологий, Россия, г. Уфа

[✉]annamel7@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Шестая и двенадцатая цели устойчивого развития направлены на обеспечение рационального использования водных ресурсов и поощрение ответственного потребления, производства, соответственно. В связи с активным развитием промышленности многие водные ресурсы подвержены антропогенным загрязнениям, особенно в результате разлива нефти. Проблема негативного влияния разливов нефти и нефтепродуктов на окружающую среду представляет угрозу для здоровья населения и устойчивости экосистем, а ее решение является актуальной темой не только для России, но и для мира в целом. В связи с этим растет спрос на экологичный и эффективный нефтесорбент с низкой стоимостью для ликвидации последствий разливов. Инновационным направлением, занимающим особую нишу, является разработка технологий создания и использования сорбционных материалов, изготовленных из растительных отходов агропромышленного комплекса. **Цель.** Анализ эффективности модификации свекловичного жома с использованием СВЧ-излучения и сравнение параметров полученного материала с коммерческими аналогами нефтесорбентов. **Методы.** Методика определения нефтеемкости и остаточной концентрации нефтепродуктов в воде с использованием оборудования «Концентратомер КН-2м». **Результаты и выводы.** Определены оптимальные параметры модификации материала, такие как размер гранул сырья и время обработки. В лабораторных условиях определены значения нефтеемкости полученного сорбента и коммерческих аналогов. По результатам экспериментов наибольшей нефтеемкостью обладает сорбент фирмы «Профсорб-Ультра». Нефтесорбент из модифицированного свекловичного жома имеет нефтеемкость 4,3 г/г, что немного выше, чем у сорбента фирмы Spill-Sorb. Определена остаточная концентрация нефти в воде после использования сорбентов. Наибольшая концентрация нефти после очистки была при использовании сорбентов «Профсорб-ультра» и «Профсорб Эко», что свидетельствует о низкой эффективности очистки. Эффективность очистки воды от нефти при использовании нефтесорбента из свекловичного жома достигла 84,55 %, что свидетельствует о высокой эффективности применения материала.

Ключевые слова: нефть, разливы нефти, сорбент, нефтесорбенты, ликвидация разливов нефти, свекловичный жом, СВЧ-излучение

Для цитирования: Мельникова А.С., Кострюкова Н.В. Модифицированный нефтесорбент из свекловичного жома для очистки поверхностной воды от нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 97–106. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941

UDC 658.567.1
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941
Scientific paper

Modified oil sorbent from beet pulp for surface water purification from oil

A.S. Melnikova[✉], N.V. Kostryukova

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

[✉]annamel7@mail.ru

Abstract. Relevance. The sixth and twelfth Sustainable Development Goals are ensuring the rational use of water resources and promoting responsible consumption, production, respectively. Due to the active development of industry, many water

resources are subject to anthropogenic pollution, especially as a result of oil spill. The problem of the negative impact of oil and petroleum product spills on the environment poses a threat to public health and ecosystem sustainability, and its solution is an urgent topic not only for Russia, but also for the world as a whole. In this regard, there is a growing demand for an environmentally friendly and efficient low-cost oil sorbent to eliminate the consequences of spills. An innovative area that occupies a special niche is the development of technologies for the creation and use of sorption materials made from plant waste from the agro-industrial complex. **Aim.** Analysis of the effectiveness of beet pulp modification using microwave radiation and comparison of the parameters of the obtained material with commercial analogues of oil sorbents. **Methods.** A method for determining the oil capacity and residual concentration of petroleum products in water using the Concentrator KN-2m equipment. **Results and conclusions.** The authors have determined the optimal parameters of the material modification, such as the size of the granules of the raw material and the processing time. The values of the oil capacity of the obtained sorbent and commercial analogues were determined in laboratory conditions. According to the results of experiments, the sorbent of Profisorb-Ultra has the highest oil capacity. The oil sorbent from modified beet pulp has an oil capacity of 4.3 g/g, which is slightly higher than that of the sorbent from Spill-Sorb. The authors determined oil residual concentration in water after the use of sorbents. The highest oil concentration after purification was when using Profisorb-ultra and Profisorb Eco sorbents, which indicates a low purification efficiency. The efficiency of water purification from oil when using oilcake from beet pulp reached 84.55%, which indicates the high efficiency of the material.

Keywords: oil, oil spills, sorbents, oil sorbents, oil spill response, beet pulp, microwave radiation

For citation: Melnikova A.S., Kostryukova N.V. Modified oil sorbent from beet pulp for surface water purification from oil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 97–106. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4941

Введение

Нефть и нефтепродукты являются одними из самых вредных загрязнителей окружающей среды на сегодняшний день. Экологические последствия разливов трудно предсказать, поскольку нефтяное загрязнение нарушает многие естественные процессы и взаимосвязи, приводит к деградации флоры, фауны и накапливается в биомассе [1]. Нефть является продуктом длительного распада и очень быстро покрывает поверхность вод плотным слоем нефтяной пленки, которая препятствует доступу воздуха и света. Основная опасность заключается в том, что нефтяные пары оказывают отравляющее действие на организм живых существ, а структура вещества крайне негативно отражается еще и на месте их обитания.

Разливы нефтепродуктов могут привести к серьезным экологическим проблемам, масштаб последствий зависит от степени загрязнения, физических и химических свойств разлитого нефтепродукта, условий окружающей среды, а также территориальных особенностей местности, на которой произошел разлив [2]. Разливы нефтепродуктов в значительной степени влияют на сельскохозяйственные культуры и водные организмы, так как в результате распространения нефтепродуктов в окружающей среде может произойти загрязнение грунтовых вод и водных объектов, что приведет к изоляции воздуха из-за препятствия диффузии кислорода и к гибели флоры и фауны объектов [3].

Углеводороды нефти представляют собой смесь простых и сложных углеводородов, в основном состоящих из углерода и водорода, а также содержащих некоторое количество азота, серы и кислорода [4]. Углеводороды подразделяются на четыре

основных категории: насыщенные, ароматические, асфальтены (фенолы, жирные кислоты, кетоны, эфиры и порфирины) и смолы (пиридины, хинолины, карбазолы, сульфиды и амиды) [5]. Они также содержат множество летучих соединений, таких как бензол, толуол, этилбензол и ксилол, а также некоторые токсичные соединения, включая полициклические ароматические углеводороды, которые связываются с почвенными компонентами и трудно поддаются деградации [6]. Их токсичность, мутагенный и канцерогенный характер, а также устойчивость в окружающей среде могут оказать негативное влияние на здоровье человека и экосистему, поэтому они рассматриваются как приоритетные загрязняющие вещества.

Существуют разные способы ликвидации разливов, в данной статье мы выделили три основных метода ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов: физико-механический, химический и биологический [7, 8]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, эффективность каждого подхода обычно зависит от многих факторов, таких как состав нефти, вязкость и объем, а также местоположение и погодные условия [9].

К физико-химическим методам можно отнести такие процессы, как сорбция/адсорбция, обратный осмос, микрофильтрация, мембранная фильтрация и пр. Диспергирование, электрокоагуляция, химическая коагуляция, сжигание, экстракция и др. способы относятся к химическому методу [10]. К биологическим методам очистки воды от нефтепродуктов относятся биоремедиация, фиторемедиация и ферментная обработка [11].

Преимуществами адсорбции являются низкие энергозатраты, простота в применении и высокая

эффективность удаления при относительно низких затратах [12]. На сегодняшний день существует множество разновидностей сорбирующих материалов с различными характеристиками и параметрами. Но большое внимание исследователей приковано к биосорбентам, так как они имеют возобновляемую сырьевую базу и низкую стоимость [13, 14]. Различные исследователи рассматривали в качестве сырьевой базой для производства биосорбентов органические отходы на растительной основе, поскольку эти материалы легкодоступны, имеют низкую стоимость, поддаются биологическому разложению и являются биосовместимыми с другим материалами. Одними из ярких представителей растительных отходов с высоким потенциалом вторичного использования является свекловичный жом.

Основным недостатком биосорбентов является низкая нефтеемкость, которая чаще всего обусловлена гидрофильными свойствами, поэтому они нуждаются в дополнительной модификации. Наиболее распространенным способом модификации является ацетилирование. Эта процедура превращает лигноцеллюлозные материалы из гидрофильных в гидрофобные путем замены некоторых их гидроксильных (–ОН) групп ацетильными (–COCH₃) группами, которые являются гидрофобными [15]. Помимо этого, возможна модификация химическими реактивами для увеличения сорбционной емкости материала. Подобные модификации могут увеличить эффективность сорбции нефти, но использование химических реагентов для модификации способно внести вторичные загрязнения в окружающую среду при ликвидации нефтеразлива.

Целью данного исследования является анализ эффективности модификации свекловичного жома с использованием СВЧ-излучения и сравнение параметров полученного материала с параметрами коммерческих аналогов нефтесорбентов.

Объекты и методика исследования

Объекты исследования. Жом сахарной свеклы был собран на Чишминском сахарном заводе (Республика Башкортостан) в феврале 2022 г. В работе исследовано два вида свекловичного жома: сухой и влажный. Сухой свекловичный жом (ССЖ) был собран после жомосушильного барабана. Влажный свекловичный жом (ВСЖ) собран после шнековой установки на производстве. Экспериментально определена массовая доля влаги исходного сырья методом высушивания до постоянной массы согласно методике [16]. Влажность составила 2,77 и 77 % от массы сырья для сухого и влажного свекловичного жома.

Для сравнения эффективности полученного сорбента из свекловичного жома проанализирова-

ны наиболее известные коммерческие аналоги нефтесорбентов на основе природных материалов преимущественно российского производства. В качестве коммерческих аналогов рассматривались различные сорбенты: «НЕС» фирмы ОЗОН, «Профсорб Ультра», «Профсорб Эко» и «Spill-sorb». Физические характеристики исследуемых материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых нефтесорбентов

Table 1. Characteristics of the studied oil sorbents

Характеристика Characteristic	Название нефтесорбента/Oil sorbent name			
	«НЕС» NES	«Профсорб Ультра» Proforsorb Ultra	«Spill- Sorb» Spill- Sorb	«Профсорб Эко» Proforsorb Eco
Размер гранул, мм Granule size, mm	0,5–5,0	0,6–5,0	0,1–10,0	0,3–10,0
Насыпная плотность, г/м ³ Bulk density, kg/m ³	80–130	70–200	135–180	120–200
Влажность Humidity, %	11	до 15 to 15	9	9–20
Заявленная нефте- емкость, кг/кг Declared oil capaci- ty, kg/kg	6–8	8	9	7

Нефтесорбент «НЕС» фирмы ОЗОН представляет собой материал на основе природного алюмосиликата (вермикулит), гидрофобизированного по специальной технологии. Материал обладает гидрофобными и олеофильными по отношению к нефти и нефтепродуктам свойствами.

Нефтесорбент «Профсорб Ультра» произведен из природного минерала и применяется для сбора разливов различных технических жидкостей с поверхности земли и воды производственных территорий и цехов, а также в качестве фильтрующей загрузки для очистных сооружений и поддержания микроорганизмов в аэротенках.

Абсорбент «Spill-Sorb» – это материал на основе канадского торфяного сфагнового мха (Canadian Sphagnum Peat moss).

Нефтесорбент «Профсорб Эко» – это материал на основе торфяного сфагнового мха, предназначенный для сбора нефтепродуктов на различных поверхностях.

Нефть для испытаний отобрана с одного из нефтеперерабатывающих заводов Республики Башкортостан (Российская Федерация), на одном из участков нефтепровода Усть-Балык–Курган–Уфа–Альметьевск (УБКУА) ПАО «Транснефть». Вязкость нефти при перекачке в холодное время года равна 0,25 см/с, плотность нефти – 850 кг/м³, среднее содержание серы в нефти – 1,5 %, парафина –

около 2 %. Средняя температура перекачиваемой нефти в зимние месяцы составляет 11,4 °С, в летние месяцы – 18,7 °С.

Модификация свекловичного жома. Модификация свекловичного жома в данном исследовании производилась с использованием СВЧ-излучения. Микроволновое излучение обычно определяется как часть электромагнитного спектра с длинами волн от 1 мм до 1 м (или эквивалентный диапазон частот от 300 МГц до 300 ГГц), расположенная между диапазонами радиоволн и инфракрасного излучения. Расширение пор в структуре материала происходит за счет высокоскоростного нагрева. Для проведения исследований использовалась СВЧ-печь с характеристиками: микроволны 1000 Вт; выходная мощность 700 Вт и 2450 МГц. Материал подвергали СВЧ-излучению в течение различных промежутков времени – от 5 до 30 минут.

Перед СВЧ-обработкой влажный свекловичный жом измельчали с использованием измельчителя NOTTER.

Сухой свекловичный жом подвергался предварительной стадии подготовки сырья, которая заключается в замачивании в дистиллированной воде на протяжении 20 минут. Это необходимо, так как дальнейшая модификация предполагает обработку СВЧ-излучением, суть которого заключается в воздействии электромагнитного излучения дециметрового диапазона на водосодержащий материал. После замачивания материал отжимали руками и подвергали СВЧ-обработке. Так как обработка в лабораторных условиях предусматривает использование малого количества материала, его влажность после ручного отжатия была примерно одинаковой (отклонение около 10 %).

Методика определения нефтеемкости. Процедура определения нефтеемкости включала в себя несколько операций: на чистую сетку в один слой помещали некоторое количество сорбента, сетку с сорбентом взвешивали для вычисления массы анализируемого сорбента (M1). Далее сетку с сорбентом погружали в нефть или нефтепродукт, выдерживали в ней в течение 10–15 минут, после чего избытку нефти давали стечь, а сетку с насыщенным сорбентом взвешивали (M2). Масса нефти, поглощенной сорбентом, вычислялась как разница между M1 и M2. Величину нефтеёмкости вычисляли как отношение массы нефти, поглощенной сорбентом, к массе сорбента [17]. Измерение проводилось три раза, и вычислялось среднее значение нефтеёмкости.

Подобную методику определения нефтеемкости использовали авторы исследования [18], в котором в качестве сорбирующего материала применялись polypropylene pads. Определение нефтеемкости проводилось в статических условиях.

Методика измерения остаточной концентрации нефти в воде. Для анализа эффективности очистки воды при использовании нефтесорбентов проведены исследования по измерению остаточной концентрации нефти в воде. Измерение остаточной концентрации нефти в воде проходило с использованием оборудования «Концентратомер КН-2м». В основу работы прибора анализатора нефтепродуктов положен фотометрический метод определения нефтепродуктов, жиров и НПАВ в четыреххлористом углероде в инфракрасной области спектра на длине волны 3,42 микрометра.

Для анализа пробы проведены процедуры подготовки реактивов и оборудования. Анализ проб производился в соответствии с [19]: полученную пробу фильтровали через четыре слоя марли и переносили в делительную воронку. В делительную воронку с пробой добавляли 1 мл серной кислоты, чтобы создать кислую среду до pH 2. Далее добавляли 40 г натрия хлористого и 10 мл четыреххлористого углерода. Пробу перемешивали в течение 5 минут на скорости 2500 оборотов в минуту, после проба отстаивалась на протяжении 10 минут. Потом добавляли 2 г натрия сернокислого на 10 мл элюата, и через 10 минут пробу переносили в концентратомер, и проводили измерения.

Массовую концентрацию нефтепродуктов в пробе воды, X, мг/дм³, рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{X_{\text{изм}} \cdot V_{\text{ЭК}} \cdot K}{V} - X_{\text{хол}},$$

где X_{изм} – результат измерений массовой концентрации нефтепродуктов в элюате на концентратомере, мг/дм³; V_{ЭК} – объем четыреххлористого углерода, использованного для проведения экстракции (V_{ЭК}=30 см³); K – коэффициент разбавления, т. е. соотношение объемов мерной колбы и аликвоты элюата; V – объем пробы анализируемой воды, см³; X_{хол} – результат измерений массовой концентрации нефтепродуктов в холостой пробе, мг/дм³.

Результаты исследования и их обсуждение

Подбор оптимальных условий модификации. Оптимальные условия получения нефтесорбента зависят от параметров исходного сырья и времени обработки. Для достижения высокой эффективности сорбции готового нефтесорбента необходимо провести исследования по подбору оптимальных условий модификации свекловичного жома.

Предварительно сухой свекловичный жом был просеян через сита разных размеров, в результате было получено три вида фракций:

- 1) большие фракции – размер гранул 2–1 см;
- 2) средние фракции – размер гранул 1–0,4 см;
- 3) мелкие фракции – размер гранул 0,4–0,2 см.

Важной характеристикой нефтесорбентов является нефтеемкость – показатель того, сколько

грамм нефти может впитать один грамм сорбента. Поэтому для определения наиболее перспективного размера фракций для дальнейшей модификации была определена нефтеемкость материала. При определении нефтеемкости проводилось три параллельных опыта, результаты по измерениям представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения нефтеемкости (г/г) в зависимости от размера гранул свекловичного жома

Table 2. Results of determination of oil capacity depending on the size of beet pulp granules

№ опыта Experience no.	Размер гранул свекловичного жома, см Beet pulp granule size, cm			
	Смешанный Mixed (2–0,2)	Крупный Large (2–1)	Средний Medium (1–0,4)	Мелкий Small (0,4–0,2)
1	2,01	1,27	1,92	2,75
2	2,11	1,12	1,97	2,73
3	2,20	1,17	1,95	2,81
Итого Total	2,11	1,19	1,95	2,76

Важным фактором для сорбционной способности является удельная поверхность материала. Площадь поверхности сферических частиц меняется в квадратичной зависимости от их размера, а объём – в кубической. Результаты, полученные эмпирическим путем (табл. 2), соотносятся с теоретическими данными, поэтому наиболее перспективным размером фракции для дальнейшей модификации является свекловичный жом с размером гранул 0,4–0,2 см. Было принято решение для дальнейшей модификации использовать сухой и влажный свекловичный жом с размером фракций 0,4–0,2 см.

Обработка сырья СВЧ-излучением проводилась при разном времени облучения – 5, 10, 20, 30 минут при толщине слоя около 0,5 см. При СВЧ-облучении на протяжении 5 и 10 минут ВСЖ имел высокий процент влажности, что препятствовало сорбции нефти.

С увеличением времени обработки СВЧ-излучения (до 30 минут) материал (сухой и отжатый свекловичный жом) приобретал золотистый и коричневый цвет. Для понимания того, как увеличение времени обработки сказывается на сорбирующей способности материала, проведены измерения параметра нефтеемкости образцов темно-коричневого и светлого цвета ВСЖ, результаты представлены в табл. 3.

СВЧ-обработка может вызывать структурные изменения в жоме, такие как дегидратация, модификация поверхности и изменение молекулярной структуры полисахаридов, что, в свою очередь, может влиять на его способность к адсорбции и

десорбции загрязняющих веществ. В результате анализа данных табл. 3 можно сделать вывод о том, что при обработке более 30 мин происходит деструкция жома сахарной свеклы, это видно по изменению цвета, в результате длительной СВЧ-обработки нефтеемкость материала уменьшается. Поэтому оптимальным временем обработки материала СВЧ-излучением является 20 минут.

Таблица 3. Результаты определения нефтеемкости (г/г) образцов свекловичного жома при длительной СВЧ-обработке

Table 3. Results of determining the oil capacity of beet pulp samples during long-term microwave processing

Проба материала Material sample	Слой Layer	Размер гранул, см Granule size, cm	Опыт/Experiment			Итого Result
			1	2	3	
Темно-коричневый Dark brown	1 слой/layer (0,5 см/см)	0,4–0,7	1,77	1,75	1,76	1,77
Светлый Light			2,29	2,60	2,75	2,55

Для определения эффективности модификации свекловичного жома исследована сорбционная емкость материала по отношению к нефти до и после СВЧ-излучения, полученные результаты представлены на рис. 1.

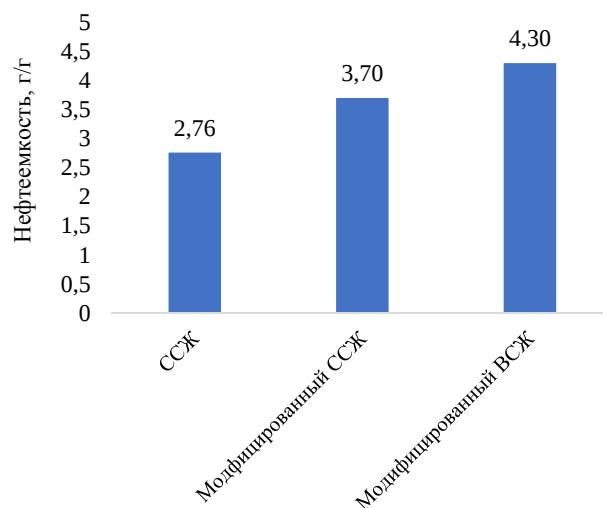


Рис. 1. Результаты определения нефтеемкости образцов свекловичного жома

Fig. 1. Results of determination of oil capacity of beet pulp samples

Согласно полученным результатам, можно сделать вывод о том, что модификация является эф-

фективной, так как нефтеемкость модифицированного ССЖ увеличилась на 25 %. Наибольшую нефтеемкость продемонстрировал модифицированный ВСЖ, поэтому было принято решение использовать ВСЖ с размером гранул 0,4–0,2 см, подверженный СВЧ-излучению на протяжении 20 минут для дальнейшего исследования.

Результаты определения нефтеемкости. Для того чтобы понять, насколько полученный сорбент является конкурентоспособным, произведено сравнение нефтеемкости коммерческих аналогов, представленных на рынке на сегодняшний день. В качестве коммерческих аналогов рассматривались сорбенты «НЕС» фирмы ОЗОН (материал на основе природного алюмосиликата); «Профсорб Ультра» (на основе природного минерала); «Профсорб Эко» (на основе торфяного сфагнового мха) и «Spill-sorb» (на основе канадского сфагнового мха). Результаты определения нефтеемкости представлены на рис. 2.

Согласно данным рис. 2, можно сделать вывод о том, что полученный сорбент является достойной альтернативой коммерческим аналогам, представленным на рынке. Также следует отметить, что заявленные параметры нефтеемкости коммерческих сорбентов не соответствуют фактическим значениям. Это может быть связано с тем, что для измерения нефтеемкости использовались разные методики. Для оценки объективной нефтеемкости материалов произведен литературный анализ материалов, из которых сделаны коммерческие сорбенты, исследуемые в этой работе.

В исследование [20] рассматривали модификацию вермикулита с использованием реактивов (метилсиликонат натрия, эмульсия на основе алкилсиликонатов щелочных металлов и олигометилгид-

ридсилоксан (Пента-804) линейного строения в сочетании с уайт-спиритом и этиловым спиртом), нефтеемкость материала зависела от обработки и варьировалась от 5,4 до 5,8 г/г. Нефтеемкость термоактивированного вермикулитового сорбента в газовой среде составила 5,4 г/г. Наибольший показатель нефтеемкости (5,8 г/г) был зафиксирован при обработке материала олигометилгидридсилоксаном (Пента-804) в сочетании с этиловым спиртом. Исходя из этих фактов можно сделать вывод, что значения нефтеемкости соотносятся. Следует отметить, что авторы использовали ту же методику для определения нефтеемкости, в качестве нефтепродукта использовалась нефть сырая Приразломного месторождения. Исходя из представленных данных, можно сделать вывод, что полученные значения нефтеемкости являются объективными.

В исследование [21] определена нефтеемкость натуральных нефтесорбентов на основе торфа, шерсти, мха и соломы. В качестве нефтепродукта использовалась нефть с плотностью 869 кг/м³ и дизельное топливо. Нефтеемкость определяли с использованием гравиметрического метода анализа, время контакта составило 2 минуты. Нефтеемкость торфа по отношению к нефти составила 7,071 г/г, а нефтеемкость мха – 8,985 г/г. Следует отметить, что нефтеемкость абсорбента Spill-Sorb на основе канадского торфяного сфагнового мха в результате исследования равна 4,28 г/г, а нефтеемкость сорбента «Профсорб Эко» на основе торфяного сфагнового мха – 4,15 г/г. Различия результатов определения нефтеемкости в текущей работе могут быть связаны с разным значением плотности используемой нефти, а также с различиями в процедуре определения нефтеемкости.

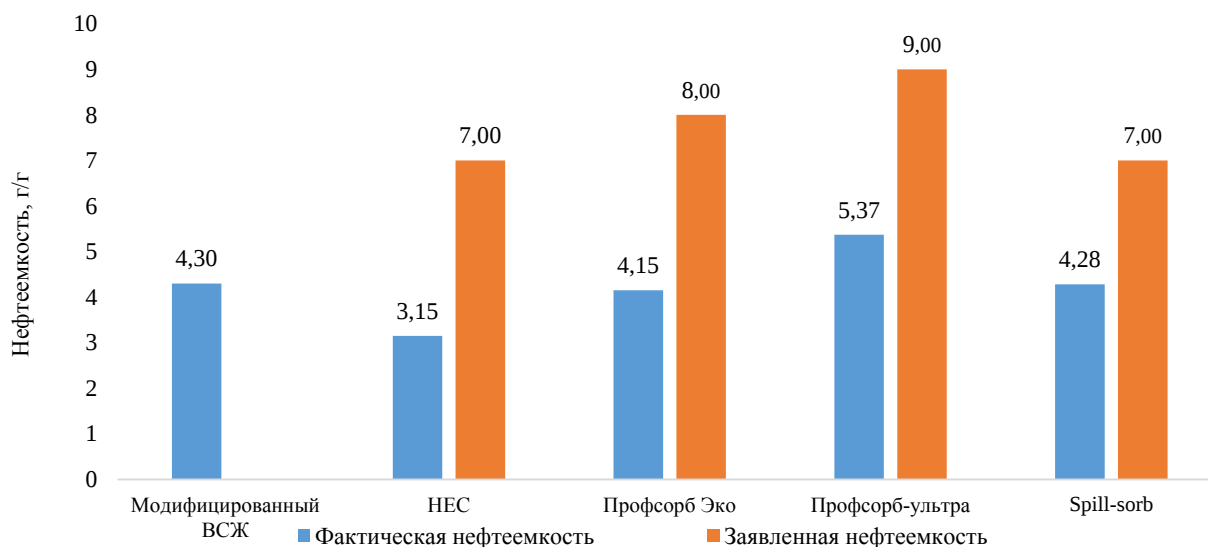


Рис. 2. Результаты определения нефтеемкости сорбентов

Fig. 2. Results of determining the oil capacity of sorbents

Авторы статьи [22] определили сорбционную способность мха по отношению к нефти согласно стандартному методу испытаний сорбирующих характеристик адсорбентов (ASTM F726-12). В результате исследования сорбционная способность мха по отношению к нефти составила 7,36 г/г. Разность значений между полученными нами данными и данными, представленными в статье, может быть связана с использованием различных методик определения нефтеемкости и разными характеристиками сорбирующего материала (мха).

Результаты определения остаточной концентрации нефти в воде. Наряду с сорбционной емкостью как количественного критерия максимального поглощения загрязняющего вещества сорбентом важным критерием эффективности работы сорбента для ликвидации разлива нефти на воде является остаточная концентрация нефти в воде после применения.

Для анализа эффективности нефтесорбентов был смоделирован разлив нефти на воде в лабораторных условиях. В емкость была налита дистиллированная вода объемом 5,0 л, температура воды составляла примерно 4 °С. Далее было добавлено 5,0 г нефти, таким образом начальная концентрация нефти равна 100 мг/л.

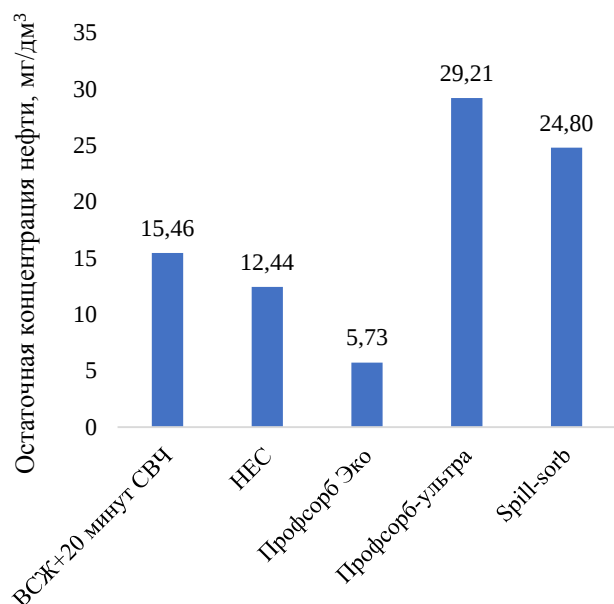


Рис. 3. Результаты определения остаточной концентрации нефти в воде после использования нефтесорбентов «НЕС» фирмы ОЗОН

Fig. 3. Results of determining oil residual concentration in water after the use of oil sorbents

На нефтяное пятно было добавлено 2,5 г нефтесорбента. Сорбент на нефтяном пятне оставался

около 7–10 минут до полной сорбции. После сорбции отработанный нефтесорбент отбирали ситечком. После очистки воды от отработанного сорбента воду перемешивали стеклянной палочкой в течение минуты для распределения остаточной концентрации нефти. Из полученной воды отбирали три пробы по 1,0 л. Эксперименты проводились в статических условиях. На рис. 3 представлены результаты определения остаточной концентрации нефти в воде после использования различных нефтесорбентов. Эти данные получены при расчете средней арифметической концентрации трех проб.

Наибольшая эффективность очистки воды от нефти зафиксирована при использовании сорбента «Spill-Sorb», она составила 94,27 %, эффективность очистки сорбента «НЕС» – 87,66 %, а модифицированного свекловичного жома – 84,55 %.

Интересным фактом является то, что эффективность очистки воды при использовании сорбента «Профсорб Ультра» намного ниже, чем у сорбента «Spill-Sorb», хотя оба сорбента изготовлены из вермикулита. Это связано с тем, что материалы изготовлены по разным технологиям с различными процедурами модификациями.

В исследовании [21] авторы изучали модификацию вермикулита с использованием реактивов, помимо параметра нефтеемкости они также изучали эффективность адсорбции дизельного топлива с поверхности воды. Для анализа проб использовали подобное оборудование, что использовалось и в данном исследовании (анализатор нефтепродуктов АН-2). Эффективность очистки воды от дизельного топлива варьировалась от 68,56 до 96,88 % в зависимости от обработки материала. Наиболее высокая эффективность очистки была достигнута при использовании вермикулита, обработанного олигометилгидридсилоксаном (Пента-804), она составила 96,88 %. Эффективность очистки воды при использовании термоактивированного вермикулита составила 68,56 %. Сопоставление полученных нами результатов с литературными данными демонстрирует их согласованность и подтверждает достоверность эксперимента.

Заключение

В результате исследования определены оптимальные параметры модификации свекловичного жома в лабораторных условиях. В ходе экспериментов выявлено, что наилучшими условиями модификации является использование отжатого свекловичного жома в качестве исходного сырья с размером гранул 0,4–0,2 см при обработке СВЧ-излучением на протяжении 20 минут.

Также в лабораторных условиях определили нефтеемкость полученного сорбента и коммерческих аналогов с использованием гравиметрическо-

го метода анализа. По результатам экспериментов наибольшей нефтеемкостью обладает сорбент фирмы «Профсорб Ультра». Нефтесорбент из модифицированного свекловичного жома является конкурентоспособным по сравнению с другими сорбентами, его нефтеемкость составила 4,30 г/г, примерно такой же результат был у сорбента фирмы «Spill-Sorb» (4,28 г/г).

Определена остаточная концентрация нефти в воде после использования сорбентов. Наибольшая концентрация нефти после очистки была при ис-

пользовании сорбентов «Профсорб Ультра» и «Spill-Sorb», что свидетельствует о низкой эффективности очистки. Эффективность очистки воды от нефти при использовании нефтесорбента из свекловичного жома достигла 84,55 %, что свидетельствует о высокой эффективности применения материала.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что модифицированный свекловичный жом является достойным конкурентом коммерческим сорбентам, используемым в настоящее время при ликвидации нефтезагрязнения с поверхности воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Othumpangat S., Castranova V. Oil spills // *Encyclopedia of Toxicology*. – 2014. – P. 677–681. DOI: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00359-6.
2. Multi-criteria analysis of different approaches to protect the marine and coastal environment from oil spills / A. Zafirakou, S. Themeli, E. Tsami, G. Aretoulis // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 6. – № 4. – P. 125. DOI: 10.3390/jmse6040125.
3. Removal of heavy crude oil from water surfaces using a magnetic inorganic-organic hybrid powder and membrane system / G. Costa Cunha, N.C. Pinho, I.A.A. Silva, L.S. Silva, J.A.S. Costa, C.M. Silva, L.P. Romao // *Journal Environmental Management*. – 2019. – Vol. 247. – P. 9–18. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.050.
4. Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon / S. Chandra, R. Sharma, K. Singh, A. Sharma // *Annals of microbiology*. – 2013. – Vol. 63. – № 2. – P. 417–431. DOI: 10.1007/s13213-012-0543-3.
5. Adeniji A.O., Okoh O.O., Okoh A.I. Petroleum hydrocarbon profiles of water and sediment of Algoa Bay, Eastern Cape, South Africa // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2017. – Vol. 14. – № 10. – P. 1263. DOI: 10.3390/ijerph14101263.
6. Concentration and isotopic composition of dissolved Pb in surface waters of the modern global ocean / P. Pinedo-González, A.J. West, A. Tovar-Sanchez, C.M. Duarte, S.A. Sañudo-Wilhelmy // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2018. – Vol. 235. – P. 41–54. DOI: 10.1016/j.gca.2018.05.005.
7. Akpomie K.G., Conradie J. Enhanced surface properties, hydrophobicity, and sorption behavior of ZnO nanoparticle-impregnated biomass support for oil spill treatment // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – № 20. – P. 25283–25299. DOI: 10.1007/s11356-021-12451-6.
8. Kundu P., Mishra I.M. Treatment and reclamation of hydrocarbon-bearing oily wastewater as a hazardous pollutant by different processes and technologies: a state-of-the-art review // *Reviews in Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 35. – № 1. – P. 73–108. DOI: 10.1515/revce-2017-0025.
9. Al-Majed A.A., Adebayo A.R., Hossain M.E. A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal Environmental Management*. – 2012. – Vol. 113. – P. 213–227. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.034.
10. Vibhute A.M., Muvvala V., Sureshan K.M. A sugar-based gelator for marine oil-spill recovery // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2016. – Vol. 55. – № 27. – P. 7782–7785. DOI: 10.1002/anie.201510308.
11. Adsorption of crude oil from aqueous solution: a review / E.C. Emenike, J. Adeleke, K.O. Iwuozor, S. Ogunniyi, C.A. Adeyanju, V.T. Amusa, H.K. Okoro, A.G. Adeniyi // *Journal of Water Process Engineering*. – 2022. – Vol. 50. – P. 103330. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103330.
12. Cost of adsorbent preparation and usage in wastewater treatment: a review / J.O. Ighalo, F.O. Omoarukhe, V.E. Ojukwu, K.O. Iwuozor, C.A. Igwegbe // *Cleaner, Chem. Eng.* – 2022. – Vol. 3. – P. 100042. DOI: 10.1016/j.clce.2022.100042.
13. Кострюкова Н.В., Мельникова А.С., Платонова А.М. Анализ сорбирующих характеристик модифицированного отхода сахарного производства // *Вестник НЦБЖД*. – 2022. – № 3 (53). – С. 108–116.
14. Оценка сорбционных свойств листового опада урбанизированной территории (на примере центрального района города Уфа) / Э.С. Насырова, Н.А. Кальсин, Н.В. Кострюкова, Д.С. Султанова // *Успехи современного естествознания*. – 2024. – № 3. – С. 52–57.
15. Thermodynamic pathway of lignocellulosic acetylation process / J.C. Onwuka, E.B. Agbaji, V.O. Ajibola, F.G. Okibe // *BMC Chem.* – 2019. – Vol. 13. – № 1. – P. 1–11. DOI: 10.1186/s13065-019-0593-8.
16. Репкин Г.И., Исаева В.А. Лабораторный практикум по дисциплине «Технологии пищевых производств». – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2010. – 76 с.
17. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные сорбенты = Oil sorbent products. – М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. – 268 с.
18. Kim H., Song Y., Lee H. Applicability of oil adsorption pads based on properties of very-low sulfur fuel oil: implications for oil spill remediation in a marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. – 2023. – Vol. 192. – № 12. – P. 115006. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115006.
19. ПНД Ф 14.1.272-2012 (ФР.1.31.2008.04409) «Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в сточных водах методом ИК-спектрофотометрии с применением концентратометров серии КН». – М., 2012. – 24 с.
20. Губкина Т.Г., Беляевский А.Т., Маслобоев В.А. Способы получения гидрофобных сорбентов нефти модификацией поверхности вермикулита органосилоксанами // *Вестник МГТУ*. – 2011. – Т. 14. – Вып. 4. – С. 767–773.

21. Paulauskiene T. Ecologically friendly ways to clean up oil spills in harbor water areas: crude oil and diesel sorption behavior of natural sorbents // *Environmental science and pollution research international*. – 2018. – Vol. 25. – №. 1. – P. 9981–9991. DOI: 10.1007/s11356-018-1316-8.
22. Anuzyte E., Vaisis V. Natural oil sorbents modification methods for hydrophobicity improvement // *Energy Procedia*. – 2018. – Vol. 147. – P. 295–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.095.

Информация об авторах

Анна Сергеевна Мельникова, аспирант, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32; annamel7@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0016-3005>

Наталья Викторовна Кострюкова, кандидат химических наук, доцент кафедры безопасности производства и промышленная экология, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, дом 32; kostrukova@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5251-1054>

Поступила в редакцию: 03.07.2024

Поступила после рецензирования: 25.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Othumpangat S., Castranova V. Oil spills. *Encyclopedia of Toxicology*, 2014, pp. 677–681. DOI: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00359-6.
2. Zafirakou A., Themeli S., Tsami E., Aretoulis G. Multi-criteria analysis of different approaches to protect the marine and coastal environment from oil spills. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 125. DOI:10.3390/jmse6040125.
3. Costa Cunha G., Pinho N.C., Silva I.A.A., Silva L.S., Costa J.A.S., Silva C.M., Romao L.P. Removal of heavy crude oil from water surfaces using a magnetic inorganic-organic hybrid powder and membrane system. *Journal Environmental Management*, 2019, vol. 247, pp. 9–18. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.050.
4. Chandra S., Sharma R., Singh K., Sharma A. Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon. *Annals of microbiology*, 2013, vol. 63, no. 2, pp. 417–431. DOI: 10.1007/s13213-012-0543-3.
5. Adeniji A.O., Okoh O.O., Okoh A.I. Petroleum hydrocarbon profiles of water and sediment of Algoa Bay, Eastern Cape, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, vol. 14, no. 10, pp. 1263. DOI: 10.3390/ijerph14101263.
6. Pinedo-González P., West A.J., Tovar-Sanchez A., Duarte C.M., Sañudo-Wilhelmy S.A. Concentration and isotopic composition of dissolved Pb in surface waters of the modern global ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, vol. 235, pp. 41–54. DOI: 10.1016/j.gca.2018.05.005.
7. Akpomie K.G., Conradie J. Enhanced surface properties, hydrophobicity, and sorption behavior of ZnO nanoparticle-impregnated biomass support for oil spill treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, no. 20, pp. 25283–25299. DOI: 10.1007/s11356-021-12451-6.
8. Kundu P., Mishra I.M. Treatment and reclamation of hydrocarbon-bearing oily wastewater as a hazardous pollutant by different processes and technologies: a state-of-the-art review. *Reviews in Chemical Engineering*, 2019, vol. 35, no. 1, pp. 73–108. DOI: 10.1515/revce-2017-0025.
9. Al-Majed A.A., Adebayo A.R., Hossain M.E. A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal Environmental Management*, 2012, vol. 113, pp. 213–227. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.07.034.
10. Vibhute A.M., Muvvala V., Sureshan K.M. A sugar-based gelator for marine oil-spill recovery. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, vol. 55, no. 27, pp. 7782–7785. DOI: 10.1002/anie.201510308.
11. Emenike E.C., Adeleke J., Iwuzor K.O., Ogunniyi S., Adeyanju C.A., Amusa V.T., Okoro H.K., Adeniyi A.G. Adsorption of crude oil from aqueous solution: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, vol. 50, pp. 103330. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103330.
12. Ighalo J.O., Omoarukhe F.O., Ojukwu V.E., Iwuzor K.O., Igwegbe C.A. Cost of adsorbent preparation and usage in wastewater treatment: a review. *Cleaner, Chem. Eng.*, 2022, vol. 3, pp. 100042. DOI: 10.1016/j.clce.2022.100042.
13. Kostryukova N.V., Melnikova A.S., Platonova A.M. Analysis of sorbing characteristics of modified sugar production waste. *Vestnik NCBŽD*, 2022, no. 3 (53), pp. 108–116. (In Russ.)
14. Nasyrova E.S., Kalsin N.A., Kostyukova N.V., Sultanova D.S. Assessment of sorption properties of leaf litter of an urbanized territory (on the example of the central district of Ufa). *Successes of modern natural science*, 2024, no. 3, pp. 52–57. (In Russ.)
15. Onwuka J.C., Agbaji E.B., Ajibola V.O., Okibe F.G. Thermodynamic pathway of lignocellulosic acetylation process. *BMC Chem*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1186/s13065-019-0593-8.
16. Repkin G.I., Isaeva V.A. *Laboratory workshop on the discipline «Technologies of food production»*. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemical Technology Publ., 2010. 76 p. (In Russ.)
17. Kamenshchikov F.A., Bogomolny E.I. *Oil sorbents = Oil sorbent products*. Moscow, Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2005. 268 p. (In Russ.)
18. Kim H., Song Y., Lee H. Applicability of oil adsorption pads based on properties of very-low sulfur fuel oil: Implications for oil spill remediation in a marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, vol. 192, no. 12, pp. 115006. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115006.
19. *Environmental regulatory document of the federal level 14.1.272-2012 ((FR.1.31.2008.04409) «The method of measuring the mass concentration of petroleum products in wastewater by IR spectrophotometry using concentration meters of the KN series»*. Moscow, 2012. 24 p. (In Russ.)

20. Gubkina T.G., Belyaevsky A.T., Masloboev V.A. Methods of obtaining hydrophobic oil sorbents by modifying the surface of vermiculite with organosiloxanes. *Vestnik MGTU*, 2011, vol. 14, Iss. 4, pp. 767–773. (In Russ.)
21. Paulauskiene T. Ecologically friendly ways to clean up oil spills in harbor water areas: crude oil and diesel sorption behavior of natural sorbents. *Environmental science and pollution research international*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 9981–9991. DOI: 10.1007/s11356-018-1316-8.
22. Anuzyte E., Vaisis V. Natural oil sorbents modification methods for hydrophobicity improvement. *Energy Procedia*, 2018, vol. 147, pp. 295–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.095.

Information about the authors

Anna S. Melnikova, Postgraduate Student, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation; annamel7@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0016-3005>

Natalia V. Kostryukova, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation; kostrukova@list.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5251-1054>

Received: 03.07.2024

Revised: 25.09.2024

Accepted: 21.04.2025