



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 628.3

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.031

EDN: BFYPYR

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО НЕФТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛЕНОК УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Карина Ильдаровна Шайхиева ¹, Земфира Талгатовна Санатуллова ²,
Альберт Анасович Хубатхузин ³, Ринат Марсович Вахидов ⁴

^{1, 2, 3, 4} Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

¹ shaykhievak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1188-7885>

² my@3sanatullova.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1620-3616>

³ al_kstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7494-8051>

⁴ wachidow@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2187-4650>

Аннотация. Исследована возможность использования нативной и модифицированной кожуры мандаринов в качестве альтернативных нефтесорбентов для удаления нефтяных пленок с водной поверхности. Определены некоторые физико-химические показатели нативной высушенной измельченной кожуры мандаринов и фракционный состав последней, используемой в дальнейших экспериментах. Вычислены значения максимального водопоглощения, а также максимальной нефтеемкости кожуры мандаринов по отношению к нефти девонского и карбонового отложений, определенные в статических и динамических условиях. Проведена обработка исследуемых альтернативных сорбционных материалов в потоке высокочастотной емкостной плазмы пониженного давления с варьированием мощности, подводимой к электродам плазмотрона. Приведены преимущества названного способа модификации перед другими методами. Определено, что обработка исследуемого сорбционного материала плазмой пониженного давления способствует некоторому увеличению значений максимальной нефтеемкости и снижению водопоглощения. Методами ИК-Фурье-спектроскопии и диэлектрической проницаемости показано увеличение гидрофобных характеристик корок мандарина за счет обработки плазмой пониженного давления в атмосфере метана, приводящее к увеличению количества метильных и метиленовых группировок на поверхности сорбционного материала. Проведены исследования по удалению нефтяных пленок с водной поверхности нативными и модифицированными образцами мандариновых корок. Показано, что обработка последних высокочастотной плазмой пониженного давления способствует увеличению эффективности удаления нефти с поверхности воды и снижению водопоглощения за счет гидрофобизации поверхности сорбционных материалов. Выявлено, что с увеличением мощности на электродах плазмотрона значения максимальной нефтеемкости и эффективности удаления пленок нефти с водной поверхности увеличиваются, а водопоглощение – уменьшается.

Ключевые слова: кожура мандаринов, высокочастотная емкостная плазма пониженного давления, модификация, нефть, разлив на водной поверхности, ликвидация.

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Для цитирования: Шайхиева К. И., Санатуллова З. Т., Хубатхузин А. А., Вахидов Р. М. Влияние плазменной обработки на сорбционные характеристики альтернативного сорбционного материала по нефти и эффективность извлечения пленок углеводородов с водной поверхности // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 217–226. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.031. EDN: <https://elibrary.ru/BFYPYR>.

Original article

EFFECT OF PLASMA TREATMENT ON SORPTION CHARACTERISTICS OF AN ALTERNATIVE SORPTION MATERIAL FOR OIL AND EFFECTIVENESS OF REMOVING HYDROCARBON FILMS FROM WATER SURFACES

Karina I. Shaikhieva ¹, Zemfira T. Sanatullova ², Albert A. Khubatkhusin ³,
Renat M. Vakhidov ⁴

© Шайхиева К. И., Санатуллова З. Т., Хубатхузин А. А., Вахидов Р. М., 2026

^{1, 2, 3, 4} Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹ shaykhievak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1188-7885>

²my@3sanatullova.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1620-3616>

³al_kstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7494-8051>

⁴wachidow@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2187-4650>

Abstract. The possibility of using native and modified tangerine peel as alternative oil sorbents for removing oil films from water surfaces was investigated. Some physicochemical properties of native dried crushed tangerine peel and the fractional composition of the latter, used in further experiments, were determined. The values of maximum water absorption, as well as the maximum oil capacity of tangerine peel in relation to oils of Devonian and Carboniferous deposits, determined under static and dynamic conditions, were calculated. The studied alternative sorption materials were processed in a flow of high-frequency capacitive plasma of low pressure with varying power supplied to the plasma torch electrodes. The advantages of this modification method over other methods are presented. It was determined that treatment of the studied sorption material with low-pressure plasma contributes to a slight increase in the values of maximum oil capacity and a decrease in water absorption. Using Fourier transform infrared spectroscopy and permittivity analysis, we demonstrated an increase in the hydrophobic properties of mandarin peels treated with low-pressure plasma in a methane atmosphere, leading to an increase in the number of methyl and methylene groups on the surface of the sorption material. Studies were conducted on the removal of oil films from water surfaces using native and modified mandarin peel samples. It was shown that treatment with high-frequency, low-pressure plasma increases the efficiency of oil removal from the water surface and reduces water absorption due to the hydrophobicity of the sorption material surface. It was found that with increasing plasma torch electrode power, the maximum oil capacity and oil film removal efficiency from the water surface increase, while water absorption decreases.

Keywords: mandarin peel, high-frequency, low-pressure capacitive plasma, modification, oil, water spill, cleanup.

Acknowledgements: The work was carried out at the expense of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to educational organizations of higher education, scientific and other organizations to support plans for the development of human resources in terms of stimulating their scientific and scientific-pedagogical work to defend doctoral dissertations and perform research (Agreement No. 10/2025-PD-KNRTU dated 12/22/2025).

For citation: Shaikhieva, K. I., Sanatullova, Z. T., Khubatkhuzin, A. A. & Vakhidov, R. M. (2026). Effect of plasma treatment on sorption characteristics of an alternative sorption material for oil and effectiveness of removing hydrocarbon films from water surfaces. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 217-226. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.031. EDN: <https://elibrary.ru/BFYYPYR>.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из насущных экологических проблем современности является загрязнение земной и водной поверхности нефтью и продуктами ее переработки. Аварийные разливы углеводородов в результате добычи, транспортировки, переработки, хранения достигли ужасающих размеров. Согласно экспертным оценкам, от 3 до 7 % добываемых углеводородов теряется в результате техногенных аварий [1]. Особенно негативно разливы нефти и нефтепродуктов влияют на водные объекты [2]. В результате проливов нефти и продуктов ее переработки на водную поверхность на последней образуется пленка углеводородов различной площади и толщины в зависимости от количества попавших нефтепродуктов. Определено, что 1 тонна нефти способна загрязнить участок водной поверхности площадью 12 км² [3], а 1 дм³ нефти – привести в негодность 10⁶ дм³ воды, используемой для водопотребления [4].

Кроме загрязнения поверхности и толщи воды, углеводороды нарушают естественный ход протекания биологических процессов в водной среде. Пленка углеводородов в больших количествах, облепляя кожные покровы макрогидробионтов и водоплавающих птиц, нарушают теплообмен последних с окружающей средой, приводя в большинстве случаев к летальным исходам [5]. Кроме того, пленка углеводородов на водной поверхности препятствует проникновению кислорода воздуха в поверхностные слои водоемов и выведению газообразных продуктов жизнедеятельности гидробионтов в атмосферный воздух, что усугубляет жизнедеятельность водных организмов [6].

Все вышесказанное требует безотлагательного извлечения углеводородов в водной поверхности в кратчайшие сроки после разлива углеводородов на водной поверхности. Для удаления пленок нефти с

водной поверхности применяют различные группы методов: механический сбор с использованием скimmers [7, 8], химический с нанесением на пленку углеводородов диспергентов [9], коагулянтов [10] и других химических реагентов; термический, основанный на сжигании пленки углеводородов [11, 12]; различные физико-химические и биологический, основанный на разложении нефтепродуктов консорциумами микроорганизмов [13]. Названным методам больше присущи недостатки, чем достоинства. Так, в частности, сбор нефти механическими сборщиками (скиммерами) и сжигание возможны только при наличии толстой пленки углеводородов на водной поверхности. Разложение нефтепродуктов микроорганизмами занимает долгое время, в течение которого легкие фракции углеводородов улетучиваются, загрязняя атмосферу, а тяжелые фракции опускаются в толщу или на дно водоемов. Химические способы лимитированы наличием реагентов в местах аварийных разливов.

Как показывает анализ литературных источников, наиболее эффективный метод, способный извлекать углеводороды с водной поверхности любой толщины является локализация пятна нефти боновыми ограждениями с последующим удалением с использованием нефтесорбентов [14–17]. В настоящее время в качестве последних в мире используются более 200 коммерческих марок. Однако сдерживающим фактором использования последних является высокая стоимость, зачастую в валюте, низкие нефтесорбционные характеристики, а также отсутствие в местах аварийных разливов, когда требуется срочная локализация и удаление углеводородов с водной поверхности.

В связи с вышеизложенным, в настоящее время в мировом пространстве интенсивно исследуются в качестве нефтесорбентов целлюлозосодержащие

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО НЕФТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛЕНОК УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

отходы от переработки древесной биомассы и сельскохозяйственного сырья [18–20]. Многочисленными статьями и обзорными работами показано, что отходы от переработки сельскохозяйственного сырья, такие как солома [21, 22] и плодовые оболочки зерен [23, 24], сердцевина и обертки початков кукурузы [25, 26], жом сахарной свеклы [27, 28] и багасса сахарного тростника [29] и многие другие отходы проявляют себя как эффективные сорбционные материалы (СМ) для удаления углеводородов с водной поверхности.

Не менее эффективными нефтесорбентами рекомендовали себя компоненты древесной биомассы, такие как кора [30, 31], листья [32, 33], иголки [33–35], шишки [35]. Высокие сорбционные характеристики по углеводородам нефти показали такие отходы от переработки плодов деревьев, как высушенная кожура бананов [36, 37], апельсинов [38, 39], помело [40] и др. Достоинством названных отходов от переработки фруктов является то, что, в основном, последние образуются в местах переработки фруктовой продукции на перерабатывающих предприятиях, недостатком – низкая эффективность вторичного использования в различных отраслях народного хозяйства, несмотря на широкий спектр биологически активных веществ в их составе. Как правило, кожура фруктов, образующаяся в результате промышленной переработки продукции и потребления населением в большинстве своем сгнивает на полигонах промышленных и бытовых отходов.

Одним из отходов от переработки фруктов деревьев является кожура мандаринов (КМ). Мякоть мандарина также используется для приготовления различных напитков, включая соки, джемы, мармелад, цукаты и другие продукты [41]. В 2025 году объем выращивания мандаринов в мире достиг более 52 млн. тонн и продолжает планомерно увеличиваться [42]. В результате отделения мякоти мандарина в мире ежегодно образуются миллионы тонн кожуры фрукта [41], которые не находят должного применения. В Российской Федерации мандарины выращиваются в южных регионах страны. В связи с вышеизложенным, проводились работы по исследованию КМ в качестве нефтесорбента для удаления пленок нефти с водной поверхности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе в качестве сорбатов применялась нефть девонского и карбонового отложений Тумутукского месторождения, добытых НГДУ «Азнакаевск нефть» ПАО «Татнефть» (Республика Татарстан) с показателями, приведенными в таблице 1.

Определение насыпной плотности, плавучести, влажности и зольности образцов КМ проводилось согласно методикам [43–46]. Определение фракционного состава измельченного СМ осуществлялось посредством ситового анализа через сита с размером отверстий 0,1, 0,5, 1 и 2 мм механическим встряхиванием в течение 10 мин. Начальная масса образца СМ составила 100 гр. Остаток на каждом сите взвешивался с точностью до 0,01 г на технических весах. Принимая сумму всех масс за 100 %, определялся выход каждой фракции делением их массы на общую массу.

Определение максимальной нефтеемкости в статических условиях проводилось по следующей методике. В чашки Петри помещались латунные сетки известной массы и наливалось по 50 см³ нефти. Затем в каждую из них сплошным слоем наносились исследуемые образцы СМ массой 1 г. Через опреде-

ленные промежутки времени (5; 15; 30; 45 и 60 мин) с помощью сетки снимался исследуемый образец СМ с сорбированной нефтью и давалось время стечь избыточному количеству сорбата, после чего сетки с сорбированной нефтью на СМ взвешивались на лабораторных весах. Нефтеемкость (статическая) определялась как отношение массы поглощенной нефти к массе СМ. Максимальное водопоглощение определялось аналогичным образом, только вместо нефти в чашки Петри наливалась водная среда.

Таблица 1 – Физико-химические показатели нефти Тумутукского месторождения

Table 1 – Physical and chemical properties of oil from the Tumutuk field

Наименование показателя	Значение	
	Девонская	Карбоновая
Плотность нефти при 15 °С, кг/м ³	899,9	912,4
Плотность нефти при 20 °С, кг/м ³	896,5	909,0
Массовая доля механических примесей, %	0,0046	0,0046
Массовая доля воды, %	0,06	0,06
Массовая доля серы, %	1,84	3,38
Массовая доля сероводорода, %	Менее 2	81,0
Давление насыщенных паров, кПа (мм. рт. ст.)	55,8 (419)	34,5 (259)

Определение нефтеемкости КМ в динамических условиях проводилось по следующей методике: в делительную воронку наливалось 50 см³ нефти, устанавливался расход жидкости, равный 2 капли/сек и пропускался через слой исследуемого СМ массой 1 г, помещенного в стеклянную колонку. Эксперимент продолжался до завершения появления капель нефти после прохождения через слой СМ. Нефтеемкость (динамическая) определялась по разнице масс отработанного СМ с сорбированной нефтью и исходного реагента.

Удаление нефтяных пленок с водной поверхности осуществлялось по следующей методике: в чашки Петри помещались латунные сетки известной массы и наливалось 50 см³ воды. Затем на водную поверхность приливалось 3 см³, 5 см³ или 7 см³ нефти. Далее 1 г исследуемого образца СМ сплошным слоем наносился на поверхность загрязненной воды. Через 30 минут с помощью сита исследуемый образец СМ снимался, а после стекания избыточного количества нефти и воды с образца КМ производилось взвешивание последней на лабораторных весах.

Остаточное содержание нефти в воде определялось методом экстракции. В делительную воронку из чашек Петри сливался остаток воды, загрязненной нефтью после удаления СМ с сорбированной водой и нефтью, добавлялось 20 см³ ССl₄. Содержимое воронки интенсивно встряхивалось в течение 1 минуты и отстаивалось в течение 5 минут. ССl₄ экстрагировал остатки нефти и по окончании отстаивания наблюдалось образование двух несмешивающихся слоев: нижний слой состоял из ССl₄ и экстрагированной нефти, а верхний – из воды. Нижний слой сливался в предварительно взвешенный бюкс и выпаривался при температуре 100 °С до постоянной массы. Далее бюкс взвешивался.

вался и по разнице масс определялось остаточное количество нефти в чашке Петри. Количество сорбированной нефти на поверхности исследуемых КМ определялось по разнице масс прилитой на поверхность воды нефти и ее остатком в чашке Петри.

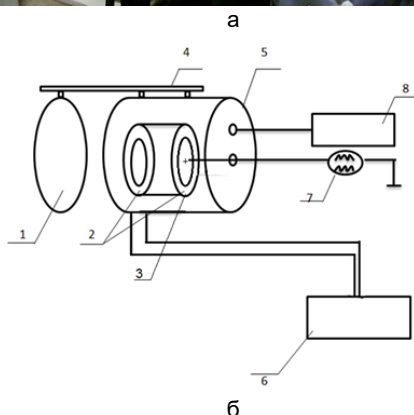


Рисунок 1 – Плазматрон: а) внешний вид; б) схема ВЧ плазменной установки: 1, 4 – система герметизации; 2 – электроды; 3 – плексигласовый барабан; 5 – вакуумная камера; 6 – вакуумный откачной пост; 7 – генератор; 8 – система подачи и регулирования газовой среды

Figure 1 – Plasmatron: a) appearance; b) diagram of an RF plasma installation (1, 4 – sealing system; 2 – electrodes; 3 – plexiglass drum; 5 – vacuum chamber; 6 – vacuum pumping station; 7 – generator; 8 – gas supply and regulation system)

Таблица 2 – Технические характеристики плазменной установки

Table 2 – Technical specifications of the plasma unit

Показатель	Значение
Напряжение питающей сети, В	380
Число фаз питающей сети	3
Частота питающей сети, Гц	50
Частота, МГц	13,56
Мощность, потребляемая от сети, кВт, не более	10,0
Мощность колебательная, кВт	0,5–8
Коэффициент полезного действия генератора, %, не менее	75
Отклонение стабилизированного анодного напряжения при регулировании в пределах 6–9,5 кВ, при изменении напряжения питающей сети, не более	±0,1
Ток анодный при анодном напряжении 9,5 кВ, не более	1
Напряжение анодное, стабилизированное, кВ, не более	9,5
Расход охлаждающей воды, дм ³ /ч, не менее	1700

Обработка КМ осуществлялась в высокочастотной установке, предназначенной для получения высокочастотной емкостной (ВЧЕ) плазмы пониженного давления, внешний вид и схема которой приведены на рисунке 1. Технические характеристики плазменной установки приведены в таблице 2.

СМ определенной массы помещался в марлевые мешочки и загружался в камеру 3 плазматрона, после чего приводился в движение плексигласовый барабан 2. Плазмообразующий газ (метан) нагревался под действием электромагнитного поля до состояния плазмы.

ИК-спектры снимались на ИК-Фурье спектрометре марки «Avatar-360» в диапазоне частот 400–4000 см⁻¹. Диэлектрические свойства нативной и модифицированной КМ определялись на широкополосном диэлектрическом спектрометре марки «Novcontrol Concept 80».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально определялся фракционный состав сорбционного материала (СМ) посредством ситового анализа. Определено, что основной размер частиц КМ составляет 1,0–1,5 мм. В дальнейшем определялись некоторые физико-химические свойства КМ. Известно, что влажность исследуемого СМ составила 25 %, насыпная плотность – 0,355 г/см³, плавучесть (72 часа) – 65,2 %, зольность – 4,13 %. Очевидно, что КМ обладает высоким значением плавучести, что предполагает его использование в качестве нефтесорбента.

В последующем определялись значения максимальной нефтеемкости нативной КМ по нефти девонского и карбонового отложений, которые составили 5,29 г/г и 5,74 г/г соответственно. Также определены значения максимальной нефтеемкости по указанной нефти в динамических условиях, которые составили по девонской нефти 4,11 г/г, по карбоновой нефти – 5,41 г/г. Значение максимального водопоглощения КМ в статических условиях составило 5,34 г/г. Очевидно, что значение максимального водопоглощения сопоставимо со значениями максимальной нефтеемкости, определенной в статических условиях. Данное обстоятельство негативно скажется при удалении пленок нефти с водной поверхности, уменьшая нефтепоглощение за счет вытеснения нефти водой из пор СМ.

Для увеличения гидрофобных характеристик КМ целесообразно провести модификацию последней. Для этого наиболее часто применяют различные гидрофобизирующие реагенты: силиконовые жидкости, жирные кислоты, полимерные материалы и др. Недостатком использования последних является необходимость наличия названных реагентов, осуществления операций растворения, отгонки растворителя, сушки СМ и т.д., усложняющих технологический процесс, и необходимость утилизации отработанных растворов. Гораздо более перспективным видится использование различных физико-химических методов. Ранее нами показана возможность использования плазмохимических методов для модификации поверхности различных полимерных материалов [47–49].

Классическая плазма представляет собой частично или полностью ионизированный газ, состоящий из фотонов, электронов, положительных и отрицательных ионов, атомов, свободных радикалов и возбужденных или невозбужденных молекул. Плазма представляет собой квазинейтральную систему частиц (в макроскопическом аспекте), проявляющую коллективное поведение из-за дальнедействующих кулоновских взаимодействий [50]. В зависимости от

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО НЕФТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛЕНОК УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

температуры, плазму подразделяют на низкотемпературную (температура меньше 10^6 K) и высокотемпературную (температура выше 10^6 K). Низкотемпературная плазма, в свою очередь, подразделяется на термическую и нетермическую.

Основной особенностью генерирования нетермической плазмы является то, что электрическая энергия используется в основном для производства энергичных электронов без нагрева газовой среды. Для создания и поддержания нетермической плазмы необходим ввод электрической мощности, достаточной для диссоциации и возбуждения атомов и молекул с последующим образованием радикалов и метастабильных молекулярных состояний. Данное обстоятельство достигается за счет использования различных источников, работающих на переменном или постоянном токе, низкочастотные (~50 кГц) или высокой частоты. Кроме того, в зависимости от возможности возбуждения плазмы в широком диапазоне давлений газа, от низкого давления до атмосферного давления ($0,1...10^5$ Па) могут быть реализованы различные типы газовых разрядов [51].

Учитывая тот факт, что плазменную модификацию необходимо осуществлять с использованием целлюлозосодержащих материалов, наиболее подходящим методом для воздействия на исследуемые СМ является ВЧЕ плазма пониженного давления. Неоспоримым преимуществом названного метода является возможность гидрофилизировать или гидрофобизировать поверхность модифицируемого материала в зависимости от вида применяемого плазмообразующего газа.

Учитывая тот факт, что возникла необходимость увеличить сорбционные характеристики СМ по отношению к нефти, с целью гидрофобизации поверхности осуществлялась обработка КМ в среде ВЧЕ плазмы пониженного давления в среде метана. Оценивалось влияние некоторых параметров ВЧЕ плазмы пониженного давления на сорбционные характеристики КМ по отношению к нефти.

Обработка КМ ВЧЕ плазмой пониженного давления осуществлялась в плазмотроне, где в качестве плазмообразующего газа использовалась смесь метана с аргонном в соотношении 1 : 2. Аргон необходим для исключения взрыва газового потока. Режимы плазмообработки приведены в таблице 3.

Очевидно, что при плазмообработке образцов КМ варьировались мощность, подводимая к электродам плазмотрона – от 1,5 до 2,5 кВт, и время – от 1 до 10 минут. Модифицированные после воздействия плазмы образцы КМ исследовались на изменение максимальной нефтеемкости, значения которых приведены в таблице 4.

Таблица 3 – Параметры обработки КМ ВЧЕ плазмой пониженного давления

Table 3 – Parameters of processing KM VCHE by reduced pressure plasma

Режимы обработки	Параметры плазмообработки				
	Давление (Р) Па	сила тока на аноде (I_a), А	Мощность, подводимая к электродам (W), кВт	Время плазмообработки (t), мин	Расход газа (Q), г/сек
1	26,6	0,6	1,5	1	0,06
2	26,6	0,6	2	5	0,06
3	26,6	0,6	2,5	10	0,06

Таблица 4 – Значения максимальной нефтеемкости плазмообработанных образцов КМ по нефти карбонового и девонского отложений

Table 4 – Values of the maximum oil-bearing capacity of plasma-treated KM samples for carboniferous and devonian oils

Вид нефти	Значение максимальной нефтеемкости			
	Режим плазмообработки			
	нативная КМ	1	2	3
<i>статические условия</i>				
девонская	5,29	6,86	7,10	7,13
карбоновая	5,74	6,92	7,27	7,43
<i>динамические условия</i>				
девонская	4,15	7,04	7,32	7,35
карбоновая	5,51	7,93	8,17	8,23

Как следует из значений, приведенных в таблице 4, с увеличением мощности, подводимой к электродам плазмотрона и времени плазмообработки, значения максимальной нефтеемкости образцов КМ в статических и динамических условиях увеличивались, достигая наибольшего значения при самом из использованных «жестком» режиме обработки СМ ВЧЕ плазмой пониженного давления. Значения максимального водопоглощения, наоборот, имели обратную тенденцию – с увеличением параметров плазмообработки названный показатель снижался по сравнению с нативной КМ. Так, образец КМ, обработанный плазмой в режиме 1, имел значение максимального водопоглощения 4,8 г/г, в режиме 2 – 4,2 г/г, в режиме 3 – 4,0 г/г. Данное обстоятельство объясняется гидрофобизацией поверхности СМ при обработке ВЧЕ плазмой пониженного давления в атмосфере метана. Атомы метана под действием ионов распадаются на свободные радикалы, обладающие высокой реакционной активностью. Полученные в результате разложения метана свободные радикалы CH_3 и H вступают во взаимодействие с молекулами биополимеров матрицы КМ. Данное обстоятельство приводит к увеличению концентрации – CH_3 групп и протонированию поверхности СМ, что способствует гидрофобизации поверхности. Данное обстоятельство подтверждается изменением картины ИК-спектров нативной и плазмообработанных образцов КМ. В частности, в ИК-спектре плазмообработанного образца КМ наблюдается увеличение интенсивности пиков в области $2750-2850$ cm^{-1} , соответствующие колебаниям C–H связям в метильных и метиленовых группировках.

В последующем исследовалось влияние плазмообработки на эффективность удаления нефти с водной поверхности. Для этого на поверхность воды в чашках Петри добавлялось по 3, 5 или 7 cm^3 нефти девонского или карбонового отложений и наносился равномерным слоем 1 г КМ. Через 30 минут с помощью ситечка известной массы СМ с поглощенной нефтью и водой извлекался, определялись количество несорбированной нефти и значения поглощенной нефти и воды нативной и плазмообработанными образцами КМ. Полученные результаты приведены в таблице 5.

Как следует из приведенных в таблице 5 данных, с увеличением напряжения на аноде плазмотрона и времени плазмообработки СМ, значения эффективности нефтепоглощения увеличиваются, а водопоглощение уменьшается. Причем, с ужесточением параметров плазмообработки, количество поглощенной нефти с поверхности воды увеличивается, а количество поглощенной воды уменьшается, что вполне логично. Данное обстоятельство объясняется гидрофобизацией порошка

КМ в результате воздействия ВЧЕ плазмой пониженного давления в атмосфере метана. Данное обстоятельство подтверждается графиками зависимости диэлектриче-

ской проницаемости КМ от частоты (рисунок 2) и ИК-Фурье спектрами нативной и плазмообработанной в режиме 3 КМ.

Таблица 5 – Значения суммарного водопоглощения, нефте- и водопоглощения, эффективности извлечения нефти и изменения водопоглощения нативной и плазмообработанными образцами КМ

Table 5 – Values of total water absorption, oil and water absorption, oil recovery efficiency, and changes in water absorption of native and plasma-treated CNT samples

Образец КМ	Σ водо- и нефте-поглощение, г/г	Водопоглощение, г/г	Нефтепоглощение, г/г	Степень удаления нефти, %	Изменение водопоглощения, %
Нефть девонского отложений					
количество нефти на водной поверхности – 3 см³ (2,69 г)					
Нативная КМ	6,56	4,07	2,49	92,57	
1	5,51	2,91	2,60	96,82	-28,57
2	5,44	2,79	2,65	98,57	-31,45
3	5,57	2,91	2,66	98,71	-28,35
количество нефти на водной поверхности – 5 см³ (4,48 г)					
Нативная КМ	6,685	2,575	4,11	91,74	
1	5,95	1,58	4,37	97,56	-38,70
2	5,94	1,51	4,43	98,86	-41,35
3	5,77	1,33	4,44	99,03	-48,35
количество нефти на водной поверхности – 7 см³ (6,27 г)					
Нативная КМ	8,095	2,465	5,63	89,79	
1	7,45	1,26	6,19	98,75	-48,69
2	7,40	1,20	6,21	99,15	-51,43
3	7,25	1,03	6,22	99,20	-58,12
Нефть карбонового отложений					
количество нефти на водной поверхности – 3 см³ (2,73 г)					
Нативная КМ	5,98	3,45	2,53	92,70	
1	4,94	2,31	2,63	96,58	-33,02
2	4,66	1,99	2,67	97,70	-42,21
3	5,28	2,63	2,65	97,10	-23,76
количество нефти на водной поверхности – 5 см³ (4,54 г)					
Нативная КМ	6,31	2,21	4,10	90,30	
1	5,88	1,46	4,42	97,39	-33,99
2	5,75	1,27	4,48	98,75	-42,75
3	5,73	1,24	4,49	98,90	-43,67
количество нефти на водной поверхности – 7 см³ (6,36 г)					
Нативная КМ	8,01	2,28	5,73	90,03	
1	7,44	1,15	6,29	98,83	-49,50
2	7,32	1,03	6,29	98,97	-54,74
3	7,25	0,95	6,30	99,03	-58,36

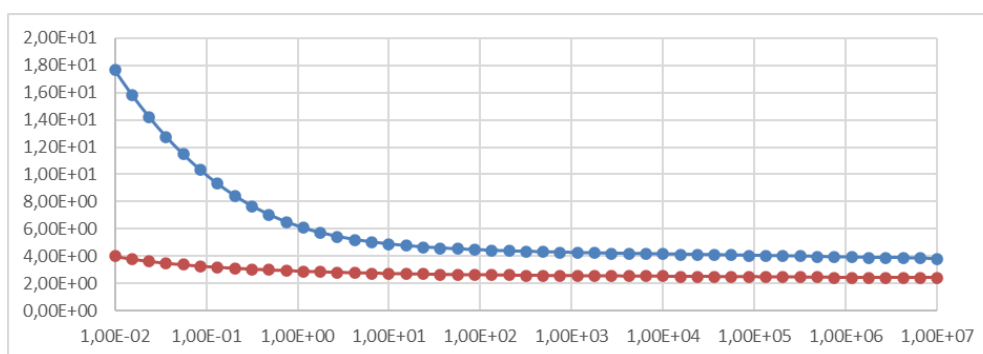


Рисунок 2 – Зависимость диэлектрической проницаемости мандариновой кожуры от частоты. Синий цвет – нативный образец КМ; оранжевый – обработанный ВЧЕ плазмой пониженного давления в режиме 3

Figure 2 – Frequency dependence of the permittivity of tangerine peel. Blue – native SM sample; orange – treated with low-pressure RF plasma in mode 3

Диэлектрическая проницаемость ϵ показывает, во сколько раз понижается напряженность электрического поля между электродами без образца и с образцом. Чем выше полярность молекул образца и чем больше концентрация полярных молекул, тем выше его диэлектрическая проницаемость. Увеличение диэлектрической проницаемости с уменьшением

частоты связано с тем, что на высоких частотах полярная молекула практически неподвижна, она не успевает отреагировать на изменение направления электрического поля, при понижении частоты молекула уже успевает сместиться из положения равновесия по направлению поля, и чем меньше частота, тем на большее расстояние молекула перемещается.

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО НЕФТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛЕНОК УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Основным типом полярных молекул, способных к поступательному перемещению в материалах растительного происхождения являются кислородсодержащие группировки. Т.е. уменьшение значений диэлектрической проницаемости порошка КМ после воздействия ВЧЕ плазмы пониженного давления в атмосфере метана свидетельствует об увеличении гидрофобных характеристик СМ.

В ИК-Фурье спектрах данное обстоятельство подтверждается увеличением интенсивности колебаний, в частности, $-CH-$ связей в метильных и метиленовых группах.

ВЫВОДЫ

Проведенными исследованиями показана возможность использования отхода пищевой перерабатывающей промышленности – измельченной кожуры мандаринов в качестве альтернативного нефтесорбента для удаления пленок нефти с водной поверхности. Определено, что обработка кожуры мандаринов ВЧЕ плазмой пониженного давления способствует увеличению значений максимальной нефтеемкости по нефти девонского и карбонового отложений и снижению максимального водопоглощения. Проведены исследования по удалению пленок нефтей с водной поверхности нативными и модифицированными образцами кожуры мандаринов. Показано, что обработка последних ВЧЕ плазмой пониженного давления способствует увеличению эффективности сорбционного извлечения нефти с поверхности воды и снижению водопоглощения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габдрахманов Т.Ф., Афанасьев И.А., Фролов Ю.А. Аварийные разливы нефти и особенности их ликвидации // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 1. С. 231–235.
2. Cohen M.A. Water pollution from oil spills // Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics (Second Edition). 2025. Vol. 3. P. 89–96. DOI: 10.1016/B978-0-323-91013-2.00039-3.
3. Захматов В.Д., Онов В.А., Щербак Н.В. Локализация и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2019. № 2. С. 64–73.
4. Караев С., Шыхалиев К. Экологические проблемы транспортировки нефти и нефтепродуктов и новые методы очистки водной поверхности от нефти и нефтепродуктов; Ганновер: ЕАЕН. 2014. С. 5–45.
5. Bhattacharjee S., Dutta T. An overview of oil pollution and oil-spilling incidents // Advances in Oil-Water Separation. 2022. P. 3–15. DOI: 10.1016/B978-0-323-89978-9.00014-8.
6. Anikief V.V., Mishukov V.F., Moiseevsky G.N., Tkalin A.V. The effect of oil films on water evaporation and oxygen content in sea water // Geo Journal. 1988. Vol. 16. № 1. P. 19–24.
7. Đorđević M., Šabalja Đ., Mohović Đ., Brčić D. Optimisation methodology for skimmer device selection for removal of the marine oil pollution // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. № 7. Article 925. P. 1–16. DOI: 10.3390/jmse10070925.
8. Balasubramani S., Raj G.A.S., Ragavan D.B., John J.J., Ramakrishnan T., Kumar S.D. Design and fabrication of oil skimmer and water waste collecting robot // AIP Conference Proceedings. 2025. Vol. 3204. № 1. Article 030014. DOI: 10.1063/5.0246711.
9. Adofo Y.K., Nyankson E., Agyei-Tuffour B. Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: A review // Heliyon. 2022. Vol. 8. № 8. Article e10153. P. 1–19. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10153.
10. Yang Y., Li J., Liang Y., Zheng D., Jing G., Liu Y., Guo M. Application of flocculant and coagulant in treatment of oily pollutants: a mini review // Petroleum Science and Techno-

logy. 2025. Vol. 43. № 9. P. 913–929. DOI: 10.1080/10916466.2024.2307412.

11. Dave D.A.E.G., Ghaly A.E. Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis // American Journal of Environmental Sciences. 2011. Vol. 7. № 5. P. 423–440.

12. Sharma V., Ramish A., Sahu O. Oil spill recovery techniques in petroleum industry: A review on treatment process // Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences. 2021. Vol. 3. № 1. P. 1–5. DOI: 10.30881/jogps.00029.

13. Ветрова А.А., Иванова А.А., Филонов А.Е., Забелин В.А., Гафаров А.Б., Нечаева И.А., Пунтус И.Ф., Бородин А.М. Биодеструкция нефти отдельными штаммами и принципы составления микробных консорциумов для очистки окружающей среды от углеводородов нефти // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. № 2–1. С. 241–257.

14. Gote M.G., Dhila H.H., Muley S.R. Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends // Nature Environment and Pollution Technology. 2023. Vol. 22. № 1. P. 39–61. DOI: 10.46488/NEPT.2023.v22i01.004.

15. Haridharan N., Sundar D., Kuruprasamy L., Anandan S., Liu C.H., Wu J.J. Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review // Polymers for Advanced Technologies. 2022. Vol. 33. № 5. P. 1353–1384. DOI: 10.1002/pat.5636.

16. Chau M.Q., Truong T.T., Hoang A.T., Le T.H. Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2025. Vol. 47. № 1. P. 8269–8282. DOI: 10.1080/15567036.2021.1928798.

17. Hailan S.M., Krupa I., McKay G. Removal of oil spills from aqueous systems by polymer sorbents // International Journal of Environmental Science and Technology. 2025. Vol. 22. № 5. P. 3833–3854. DOI: 10.1007/s13762-024-05959-0.

18. Ouyang D., Lei X., Zheng H. Recent advances in biomass-based materials for oil spill cleanup // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. № 3. Article 620. P. 1–37. DOI: 10.3390/nano13030620.

19. Olalekan A.A., Oluwatoyin A.O. Adsorption of crude oil spill from aqueous solution using agro-wastes as adsorbents // Journal of Scientific Research and Reports. 2021. Vol. 27. № 4. P. 27–52. DOI: 10.9734/JSRR/2021/V27I430376.

20. Wolok E., Barafi J., Joshi N., Girimonte R., Chakraborty S. Study of bio-materials for removal of the oil spill // Arabian Journal of Geosciences. 2020. Vol. 13. № 23. Article 1244. P. 1–11. DOI: 10.1007/s12517-020-06244-3.

21. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности. 1. Пшеничная и рисовая солома (обзор мировой литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 9. С. 11–22. DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-9-11-22.

22. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности 2. Ячменная и кукурузная солома (обзор мировой литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 10. С. 27–36. DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-10-27-36.

23. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности 3. Плодовые оболочки зерен пшеницы и риса (обзор мировой и отечественной литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2025. № 2. С. 2–12. DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-2-2-12.

24. Шайхиев И.Г., Шайхиева К.И., Свергузова С.В., Дебердеев Т.Р. Использование отходов от переработки злаковых культур для удаления разливов углеводородов с водной поверхности 4. Плодовые оболочки зерен ячменя, овса и гречихи (обзор мировой и отечественной литературы).

ры) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2025. № 3. С. 8–17. DOI: 10.31044/1994-6260-2025-0-3-8-17.

25. Шайхиев И.Г., Бадрутдинова Г.М., Чаптарова Е.А., Санатуллова З.Т., Резапова Н.В. Влияние кислотной модификации сердцевинки початков кукурузы (*Zea mays*) на удаление пленок нефти с водной поверхности // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2025. № 1. С. 1–20. DOI: 10.17122/ogbus-2025-1-6-25.

26. Шайхиев И.Г., Санатуллова З.Т., Шайхиева К.И., Замилова Д.А., Фадеева М.А. Альтернативный нефтесорбент для удаления разливов углеводородов с водной поверхности // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. № 6 (146). С. 146–158.

27. Шайхиев И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И., Мавлетбаева А.И. Исследование отхода от переработки сахарной свеклы в качестве сорбционного материала минеральных масел // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 17. С. 258–261.

28. Шайхиев И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И., Мавлетбаева А.И. Исследование возможности использования жома сахарной свеклы в качестве сорбционного материала легких нефтепродуктов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 13. С. 246–248.

29. Ferreira P.S., Scopel E., Pinto L.O., Rezende C.A. Hydrophobic and robust sugarcane bagasse-based biosorbents for oil spill cleanup: synergy of hydrothermal treatment and cellulose nanofibril reinforcement // ACS Sustainable Resource Management. 2025. Vol. 2. № 5. P. 853–863. DOI: 10.1021/acssusresmgmt.5c00110.

30. Шайхиев И.Г., Хаматгаллимова Д.Н., Дебердеев Т.Р., Свергузова С.В. Кора деревьев – перспективный сорбционный материал для извлечения углеводородов из водных сред (обзор мировой и отечественной литературы) // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 2. С. 10–20. DOI: 10.31044/1994-6260-2024-0-2-10-20.

31. Зарипова А.Р., Хаматгаллимова Д.Н., Шайхиев И.Г. Исследование коры дуба черешчатого (*Quercus robur*) в качестве сорбционного материала для удаления пленок нефти с водной поверхности // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 4 (60). С. 50–62. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.4.50.

32. 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. 2020. Vol. 791. № 1, Article 012076. P. 1–9. DOI: 10.1088/1757-899X/791/1/012076.

33. Syatchenko A.V., Sverguza S.V., Fomina E.V., Shaikhiev I.G. Using leaves and needles of trees as sorption materials for the extraction of oil and petroleum products from solid and water surfaces // Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 160. P. 299–306. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_40.

34. Шайхиев И.Г., Степанова С.В., Шайхиева К.И. Исследование хвои сосновых деревьев в качестве сорбционных материалов для удаления нефти и масел с водной поверхности // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20. № 3. С. 183–186.

35. Мурашко Е.Э., Санатуллова З.Т., Шайхиев И.Г., Садыкова С.В. Влияние параметров обработки ВЧ плазмой пониженного давления на нефте- и водопоглощение компонентов *Larix sibirica* // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 17. С. 121–126.

36. El-Din G.A., Amer A.A., Malsh G., Hussein M. Study on the use of banana peels for oil spill removal // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57. № 3. P. 2061–2068. DOI: 10.1016/j.aej.2017.05.020.

37. Dawodu F.A., Abonyi C.J., Akpomie K.G. Feldspar-banana peel composite adsorbent for efficient crude oil removal from solution // Applied Water Science. 2021. Vol. 11. № 1. Article 3. P. 1–10. DOI: 10.1007/s13201-020-01335-8.

38. El Gheriany I.A., El Saqa F.A., Amer A.A.E.R., Hussein M. Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59. № 2. P. 925–932. DOI: 10.1016/j.aej.2020.03.024.

39. Abubakar A.M., Diriki H.D., Umdagdas L.B., Mukwana K.C., Bhutto A.A. Sigma XL optimisation of oil spill removal from water using orange peels bio-adsorbent // Malaysian Journal of Chemical Engineering and Technology. 2024. Vol. 7. № 2. P. 131–158. DOI: 10.24191/mjct.v7i2.1357.

40. Zou J., Liu X., Chai W., Zhang X., Li B., Wang Y., Ma Y. Sorption of oil from simulated seawater by fatty acid-modified pomelo peel // Desalination and Water Treatment. 2015. Vol. 56. № 4. P. 939–946. DOI: 10.1080/19443994.2014.941302.

41. Kumar H., Bhardwaj K., Sharma R., Nepovimova E., Kuča K., Dhanjal D.S., Verma R., Bhardwaj P., Sharma S., Kumar D. Fruit and vegetable peels: utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications // Molecules. 2020. Vol. 25. Article 2812. P. 1–21. DOI: 10.3390/molecules2.

42. Gonzatto M., Santos J.S. Introductory chapter: world fruit crops production and research // Fruit Crops Science – Ecophysiological and Horticultural Perspectives. 2025. Chapter 1. P. 3–10. DOI: 10.5772/intechopen.10060.17.

43. ГОСТ 16190-70. Адсорбенты. Метод определения насыпной плотности. М.: Издательство стандартов, 1970. 7 с.

44. Каменщиков Ф.А. Удаление нефтепродуктов с водной поверхности и грунта / Ф.А. Каменщиков, Е.И. Богомольный. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. 525 с.

45. ГОСТ 12597-67. Адсорбенты. Метод определения массовой доли воды в активных углях и катализаторах на их основе. М.: Издательство стандартов, 1989. 6 с.

46. ГОСТ 11022-95. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. М.: Стандартинформ. 2006. 8 с.

47. Шайхиев И.Г., Низамов Р.Х., Абдуллин И.Ш., Фридрих С.В. Модификация альтернативного сорбента плазменной обработкой для увеличения нефтеемкости и гидрофобности // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 4. С. 24–27.

48. Шайхиев И.Г., Фазуллина З.Т., Абдуллин И.Ш., Гафаров И.Г. Влияние обработки ВЧ-плазмой пониженного давления на эффективность удаления отходом валяльно-войлочного производства с водной поверхности масла ТП-22 // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 19. С. 42–48.

49. Шайхиев И.Г., Хасаншина Э.М., Абдуллин И.Ш., Степанова С.В. Влияние плазменной обработки льняной костры на удаление разливов девонской нефти с водной поверхности и гидрофобные характеристики // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 8. С. 165–171.

50. Rutscher A., Lofhagen D., Sigener F. [et al.]. Low temperature plasmas – fundamentals, technologies and techniques. Weinheim: Wiley-VCH, Berlin, Germany, 2008. Vol. 1. 945 p.

51. Велихов Е.П. Физические явления в газоразрядной плазме: Учебное руководство / Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. 159 с.

Информация об авторах

К. И. Шайхиева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

З. Т. Санатуллова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная экология» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

А. А. Хубатхузин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Плазмохимические технологии наноматериалов и покрытий» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Ка-

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СОРБЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО НЕФТИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛЕНОК УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

занский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

Р. М. Вахидов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология твердых химических веществ» Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» в г. Казани.

REFERENCES

1. Gabdrakhmanov, T.F., Afanasev, I.A., Frolov, Yu.A. (2017). Avarii i razlivi nefi i osobennosti ikh likvidatsii. *Neftegazovoe delo*. 15(1). S. 231-235. (In Russ.).
2. Cohen, M.A. (2025). Water pollution from oil spills. *Encyclopedia of Energy, Natural Resource, and Environmental Economics (Second Edition)*. 3. 89-96. DOI: 10.1016/B978-0-323-91013-2.00039-3.
3. Zakhamatov, V.D., Onov, V.A., Shcherbak, N.V. (2019). Lokalizatsiya i likvidatsiya avariinikh razlivov nefi i nefteproduktov. *Problemi upravleniya riskami v tekhnosfere*. (2). 64-73. (In Russ.).
4. Karaev, S., Shikhaliev, K. (2014). Ekologicheskie problemi transportirovaniya nefi i nefteproduktov i novye metody ochistki vodnoi poverkhnosti ot nefi i nefteproduktov. *Gannover: YeAEN*. 5-45.
5. Bhattacharjee, S., Dutta, T. (2022). An overview of oil pollution and oil-spilling incidents. *Advances in Oil-Water Separation*. 3-15. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89978-9.00014-8>.
6. Anikiev, V.V., Mishukov, V.F., Moiseevsky, G.N., Tkalin, A.V. (1988). The effect of oil films on water evaporation and oxygen content in sea water. *Geo Journal*. 16(1). 19-24.
7. Đorđević, M., Šabalja, Đ., Mohović, Đ., Brčić, D. (2022). Optimisation methodology for skimmer device selection for removal of the marine oil pollution. *Journal of Marine Science and Engineering*. 10(7). 925. 1-16. <https://doi.org/10.3390/jmse10070925>.
8. Balasubramani, S., Raj, G.A.S., Ragavan, D.B., John, J.J., Ramakrishnan, T., Kumar, S.D. (2025). Design and fabrication of oil skimmer and water waste collecting robot. *AIP Conference Proceedings*. 2025. 3204(1). 030014. <https://doi.org/10.1063/5.0246711>.
9. Adofo, Y.K., Nyankson, E., Agyei-Tuffour, B. (2022). Dispersants as an oil spill clean-up technique in the marine environment: A review. *Heliyon*. 8(8). e10153. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10153>.
10. Yang, Y., Li, J., Liang, Y., Zheng, D., Jing, G., Liu, Y., Guo, M. (2025). Application of flocculant and coagulant in treatment of oily pollutants: a mini review. *Petroleum Science and Technology*. 43(9). 913-929. <https://doi.org/10.1080/10916466.2024.2307412>.
11. Dave, D.A.E.G., Ghaly, A.E. (2011). Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis. *American Journal of Environmental Sciences*. 7(5). 423-440.
12. Sharma, V., Ramish, A., Sahu, O. (2021). Oil spill recovery techniques in petroleum industry: A review on treatment process. *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences*. 3(1). 1-5. <https://doi.org/10.30881/jogps.00029>.
13. Vetrova, A.A., Ivanova, A.A., Filonov, A.E., Zabelin, V.A., Gafarov, A.B., Nechaeva, I.A., Puntus, I.F., Boronin, A.M. (2013). Biodestruktsiya nefi ot delnimi shtammami i printsipi sostavleniya mikrobnikh konsortsiumov dlya ochistki okruzhayushchei sredi ot uglevodorodov nefi. *Izvestiya Tskogo gosudarstvennogo universiteta. Yestestvennye nauki*. 2-1. 241-257. (In Russ.).
14. Gote, M.G., Dhila, H.H., Muley, S.R. (2023). Advanced synthetic and bio-based sorbents for oil spill clean-up: a review of novel trends. *Nature Environment and Pollution Technology*. 22(1). 39-61. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2023.v22i01.004>.
15. Haridharan, N., Sundar, D., Kurrupasamy, L., Anandan, S., Liu, C.H., Wu, J.J. (2022). Oil spills adsorption and cleanup by polymeric materials: A review. *Polymers for Advanced Technologies*. 33(5). 1353-1384. <https://doi.org/10.1002/pat.5636>.
16. Chau, M.Q., Truong, T.T., Hoang, A.T., Le, T.H. (2025). Oil spill cleanup by raw cellulose-based absorbents: a green and sustainable approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 47(1). 8269-8282. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1928798>.
17. Hailan, S.M., Krupa, I., McKay, G. (2025). Removal of oil spills from aqueous systems by polymer sorbents. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 22(5). 3833-3854. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05959-0>.
18. Ouyang, D., Lei, X., Zheng, H. (2023). Recent advances in biomass-based materials for oil spill cleanup. *Nanomaterials*. 13(3). 620. 1-37. <https://doi.org/10.3390/nano13030620>.
19. Olalekan, A.A., Oluwatoyin, A.O. (2021). Adsorption of crude oil spill from aqueous solution using agro-wastes as adsorbents. *Journal of Scientific Research and Reports*. 27(4). 27-52. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2021/V27I430376>.
20. Wolok, E., Barafi, J., Joshi, N., Girimonte, R., Chakraborty, S. (2020). Study of bio-materials for removal of the oil spill. *Arabian Journal of Geosciences*. 13(23). 1244.1-11. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06244-3>.
21. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Svergunova, S.V., Deberdeev, T.R. (2024). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti. 1. Pshenichnaya i risovaya soloma (obzor mirovoi literatury). *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 9. 11-22. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-9-11-22>. (In Russ.).
22. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Svergunova, S.V., Deberdeev, T.R. (2024). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti. 2. Yachmennaya i kukuruznaya soloma (obzor mirovoi literatury). *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 10. 27-36. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-10-27-36>. (In Russ.).
23. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Svergunova, S.V., Deberdeev, T.R. (2025). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti. 3. Plodovie obolochki zeren pshenitsi i risa (obzor mirovoi i otechestvennoi literatury). *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 2. 2-12. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2025-0-2-2-12>. (In Russ.).
24. Shaikhiev, I.G., Shaikhieva, K.I., Svergunova, S.V., Deberdeev, T.R. (2025). Ispolzovanie otkhodov ot pererabotki zlakovikh kultur dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti. 4. Plodovie obolochki zeren yachmenya, ovsa i grechikhi (obzor mirovoi i otechestvennoi literatury). *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*. 3. 8-17. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2025-0-3-8-17>. (In Russ.).
25. Shaikhiev, I.G., Badrtidinova, G.M., Chaptarova, Ye.A., Sanatullova, Z.T., Rezapova, N.V. (2025). Vliyaniye kislотноi modifikatsii serdtsevinu pochatkov kukuruzy (*Zea mays*) na udalenie plenok nefi s vodnoi poverkhnosti. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo»*. 1. 1-20. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2025-1-6-25>. (In Russ.).
26. Shaikhiev, I.G., Sanatullova, Z.T., Shaikhieva, K.I., Zamilova, D.A., Fadeeva, M.A. (2023). Alternativnii neftesorbent dlya udaleniya razlivov uglevodorodov s vodnoi poverkhnosti. *Problemi sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*. 6(146). 146-158. (In Russ.).
27. Shaikhiev, I.G., Stepanova, S.V., Shaikhieva, K.I., Mavletbaeva, A.I. (2015). Issledovanie otkhoda ot pererabotki sakharnoi svekli v kachestve sorbtionnogo materiala mineralnikh masel. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 18(17). 258-261. (In Russ.).
28. Shaikhiev, I.G., Stepanova, S.V., Shaikhieva, K.I., Mavletbaeva, A.I. (2015). Issledovanie vozmozhnosti ispolzovaniya zhoma sakharnoi svekli v kachestve sorbtionnogo materiala legkikh nefteproduktov. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 18(13). 246-248. (In Russ.).
29. Ferreira, P.S., Scopel, E., Pinto, L.O., Rezende, C.A. (2025). Hydrophobic and robust sugarcane bagasse-based biosorbents for oil spill cleanup: synergy of hydrothermal treatment and cellulose nanofibril reinforcement. *ACS Sustainable Resource Management*. 2(5). 853-863. <https://doi.org/10.1021/acssusresmg.5c00110>.

30. Shaikhiev, I.G., Khamatgalimova, D.N., Deberdeev, T.R., Sverguzova, S.V. (2024). Kora derevov - perspektivnii sorbtsionnyi material dlya izvlecheniya uglevodorodov iz vodnikh sred (obzor mirovoi i otechestvennoi literatury). Vse materialy. *Entsiklopedicheskii spravochnik*. 2. 10-20. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2024-0-2-10-20>. (In Russ.).
31. Zaripova, A.R., Khamatgalimova, D.N., Shaikhiev, I.G. (2023). Issledovanie kori duba che-reschatogo (*Quercus robur*) v kachestve sorbtsionnogo materiala dlya udaleniya plyonok nefti s vodnoi poverkhnosti. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie*. 4(60). 50-62. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2023.4.50>. (In Russ.).
32. Stepanova, S.V., Alekseeva, A.A., Khafizova, L.Y. (2020). 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*. 791(1). 012076.1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/791/1/012076>.
33. Svyatchenko, A.V., Sverguzova, S.V., Fomina, E.V., Shaikhiev, I.G. (2021). Using leaves and needles of trees as sorption materials for the extraction of oil and petroleum products from solid and water surfaces. *Environmental and Construction Engineering: Reality and the Future. Lecture Notes in Civil Engineering*. 160. 299-306. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_40.
34. Shaikhiev, I.G., Stepanova, S.V., Shaikhieva, K.I. (2017). Issledovanie khvoi osnovnykh derevov v kachestve sorbtsionnykh materialov dlya udaleniya nefti i masel s vodnoi poverkhnosti. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 20(3). 183-186. (In Russ.).
35. Murashko, Ye.E., Sanatullova, Z.T., Shaikhiev, I.G., Sadikova, S.V. (2017). Vliyaniye parametrov obrabotki VCh plazmoi ponizhennogo davleniya na nefte- i vodoropogloshchenie komponentov Larix sibirica. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 20(17). 121-126. (In Russ.).
36. El-Din, G.A., Amer, A.A., Malsh, G., Hussein, M. (2018). Study on the use of banana peels for oil spill removal. *Alexandria Engineering Journal*. 57(3). 2061-2068. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.020>.
37. Dawodu, F.A., Abonyi, C.J., Akpomie, K.G. (2021). Feldspar-banana peel composite adsorbent for efficient crude oil removal from solution. *Applied Water Science*. 11(1). 3. P. 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01335-8>.
38. El Gheriany, I.A., El Saqa, F.A., Amer, A.A.E.R., Hussein, M. (2020). Oil spill sorption capacity of raw and thermally modified orange peel waste. *Alexandria Engineering Journal*. 59(2). 925-932. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.024>.
39. Abubakar, A.M., Diriki, H.D., Umdagas, L.B., Mukwana, K.C., Bhutto, A.A. (2024). Sigma XL optimisation of oil spill removal from water using orange peels bio-adsorbent. *Malaysian Journal of Chemical Engineering and Technology*. 7(2). 131-158. <https://doi.org/10.24191/mjcet.v7i2.1357>.
40. Zou, J., Liu, X., Chai, W., Zhang, X., Li, B., Wang, Y., Ma, Y. (2015). Sorption of oil from simulated seawater by fatty acid-modified pomelo peel. *Desalination and Water Treatment*. 56(4). 939-946. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.941302>.
41. Kumar, H., Bhardwaj, K., Sharma, R., Nepovimova, E., Kuča, K., Dhanjal, D.S., Verma, R., Bhardwaj, P., Sharma, S., Kumar, D. (2020). Fruit and vegetable peels: utilization of high value horticultural waste in novel industrial applications. *Molecules*. 25. 2812. 1-21. <https://doi.org/10.3390/molecules25>.
42. Gonzatto, M., Santos, J.S. (2025). Introductory chapter: world fruit crops production and research. *Fruit Crops Science - Ecophysiological and Horticultural Perspectives. Chapter 1*. 3-10. <https://doi.org/10.5772/intechopen.10060.17>.
43. GOST 16190-70. (1970). *Adsorbenti. Metod opredeleniya nasipnoi plotnosti*. M.: Izdatelstvo standartov. 7. (In Russ.).
44. Kamenshchikov, F.A. (2006). Udaleniye nefteproduktov s vodnoi poverkhnosti i grunta. *Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika*. 525. (In Russ.).
45. GOST 12597-67. (1989). *Adsorbenti. Metod opredeleniya massovoi doli vodi v aktivnykh uglyakh i katalizatorakh na ikh osnove*. M.: Izdatelstvo standartov. 6. (In Russ.).
46. GOST 11022-95. (2006). Topливо tverdoe mineralnoe. Metodi opredeleniya zolnosti. M.: Standartinform. 8. (In Russ.).
47. Shaikhiev, I.G., Nizamov, R.Kh., Abdullin, I.Sh., Fridland, S.V. (2010). Modifikatsiya alternativnogo sorbenta plazmennoi obrabotkoi dlya uvelicheniya nefteemkosti i gidrofobnosti. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*. 4. 24-27. (In Russ.).
48. Shaikhiev, I.G., Fazullina, Z.T., Abdullin, I.Sh., Gafarov, I.G. (2011). Vliyaniye obrabotki vch-plazmoi ponizhennogo davleniya na effektivnost udaleniya otkhodom valyalno-voilochnogo proizvodstva s vodnoi poverkhnosti masla TP-22. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 19. 42-48. (In Russ.).
49. Shaikhiev, I.G., Khasanshina, E.M., Abdullin, I.Sh., Stepanova, S.V. (2011). Vliyaniye plazmennoi obrabotki inyanoi kostri na udaleniya rozlivov devonskoi nefti s vodnoi poverkhnosti i gidrofobnye kharakteristiki. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 8. 165-171. (In Russ.).
50. Rutscher, A., Lofhagen, D., Sigeneger, F. (2008). Low temperature plasmas - fundamentals, technologies and techniques. *Weinheim: Wiley-VCH, Berlin, Germany*. 1. 945.
51. Velikhov, Ye.P. (1987). Fizicheskie yavleniya v gazozaryadnoi plazme: Uchebnoye rukovodstvo / Moskva: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury. 159. (In Russ.).

Information about the Authors

K.I. Shaikhieva - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Environmental Engineering at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

Z.T. Sanatullova - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Environmental Engineering at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

A.A. Khabatkhuzin - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Plasma-Chemical Technology of Nanomaterials and Coatings at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

R.M. Vakhidov - is a Candidate of Technical Sciences and Associate Professor in the Department of Solid Chemical Engineering at the Kazan National Research Technological University in Kazan.

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

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.
The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.