

Научная статья

Original article

УДК 628.316.1:504.5:677.027.625.4

doi: 10.55186/2413046X_2024_9_6_289

**ИЗУЧЕНИЕ И ВЫБОР ВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ
СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
STUDY AND SELECTION OF FIBROUS WASTE FOR WASTEWATER
TREATMENT FROM ORGANIC POLLUTANTS**



Сигаева Мария Николаевна, аспирант, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, E-mail: sigaevamasha@gmail.com

Зайцева Яна Павловна, преподаватель, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, E-mail: mitchick@yandex.ru

Sigaeva Mariia Nikolaevna, Graduate student, A.N. Kosygin Russian State University, Moscow, E-mail: sigaevamasha@gmail.com

Zaytseva Yana Pavlovna, assistant, A.N. Kosygin Russian State University, Moscow, E-mail: mitchick@yandex.ru

Аннотация. Введение. Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска экологически безопасных и экономически целесообразных сорбентов для очистки сточных вод от органических загрязнений, в частности, нефти и нефтепродуктов. Цель работы - изучение сорбционных свойств волокнистых отходов льноперерабатывающей промышленности и оценка эффективности их плазменной модификации.

Методы. Эмпирическую базу исследования составили образцы льняной костры до и после низкотемпературной плазменной обработки в высокочастотном генераторе. Сорбционную способность материалов по отношению к нефти изучали в статических условиях. Кинетику процесса

сорбции анализировали путем построения функциональных зависимостей логарифмического вида с использованием метода наименьших квадратов (МНК).

Результаты. Установлено, что плазменная модификация позволяет значительно повысить сорбционную емкость льняной костры за счет развития ее удельной поверхности и увеличения количества активных центров. Получены математические модели, адекватно описывающие кинетику сорбции нефти исходной ($R^2 = 0,998$) и модифицированной ($R^2 = 0,997$) льняной кострой. Показано, что относительная погрешность моделей не превышает 0,03%.

Обсуждение. Результаты работы открывают перспективы использования плазменно-модифицированной льняной костры в качестве эффективного и экологичного сорбента для ликвидации нефтяных разливов и доочистки промышленных стоков. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию параметров плазменной обработки, а также масштабирование процесса.

Abstract. Introduction. The relevance of the study is due to the need to search for environmentally safe and economically feasible sorbents for wastewater treatment from organic pollutants, in particular, oil and petroleum products. The purpose of the work is to study the sorption properties of fibrous waste from the flax processing industry and evaluate the effectiveness of their plasma modification.

Methods. The empirical basis of the study was made up of samples of flax bonfires before and after low-temperature plasma treatment in a high-frequency generator. The sorption capacity of materials in relation to oil was studied under static conditions. The kinetics of the sorption process was analyzed by constructing logarithmic functional dependencies using the least squares method (OLS).

Results. It was found that plasma modification can significantly increase the sorption capacity of flax bonfire due to the development of its specific surface area and an increase in the number of active centers. Mathematical models have been

obtained that adequately describe the kinetics of oil sorption by the original ($R^2 = 0.998$) and modified ($R^2 = 0.997$) linseed. It is shown that the relative error of the models does not exceed 0.03%.

Discussion. The results of the work open up prospects for the use of plasma-modified flax bonfire as an effective and environmentally friendly sorbent for the elimination of oil spills and post-treatment of industrial wastewater. It is advisable to direct further research to optimize the parameters of plasma processing, as well as scaling the process.

Ключевые слова: льняная костра, плазменная обработка, сорбция, нефть, органические загрязнения, кинетика сорбции, высокочастотный генератор, уравнение МНК

Keywords: flax bonfire, plasma treatment, sorption, oil, organic pollutants, sorption kinetics, high-frequency generator, MNC equation

ВВЕДЕНИЕ

Очистка сточных вод от органических загрязнений, таких как нефть и продукты ее переработки, является одной из важнейших экологических задач современности [1]. Нефтяное загрязнение наносит непоправимый ущерб водным экосистемам, негативно влияет на здоровье человека, снижает рекреационный потенциал водоемов [2]. В связи с этим актуальной проблемой выступает поиск эффективных сорбентов, способных извлекать нефтепродукты из водной среды.

Перспективным направлением считается использование в качестве нефтяных сорбентов растительных материалов и отходов их переработки [3]. Такие сорбенты характеризуются низкой стоимостью, доступностью, экологической безопасностью и биоразлагаемостью [4]. Особый интерес представляют волокнистые отходы льноперерабатывающей промышленности, в частности, костра льна. Данный материал содержит до 45-58% целлюлозы [5], что обуславливает его значительную сорбционную емкость по отношению к нефти.

Как показывают исследования [6, 7], сорбционные свойства растительных материалов можно существенно улучшить путем их предварительной модификации. Одним из наиболее перспективных методов модифицирования является низкотемпературная плазменная обработка [8]. Под действием плазмы происходит развитие удельной поверхности сорбента, увеличение количества активных центров, изменение химического состава поверхности [9].

Несмотря на очевидные преимущества плазменной модификации растительных сорбентов, ее влияние на сорбционные свойства льняной костры остается малоизученным. Поэтому целью настоящей работы явилось исследование сорбционной способности отходов льнопереработки и оценка эффективности их модифицирования в высокочастотной плазме пониженного давления. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследовать кинетику сорбции нефти образцами льняной костры до и после плазменной обработки.
2. Подобрать адекватные математические модели для описания кинетических зависимостей процесса сорбции.
3. Оценить влияние плазменной модификации на сорбционную емкость и скорость поглощения нефти льняной кострой.

МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использовали образцы костры льна, предоставленные льноперерабатывающим предприятием г. Н. Предварительно костру высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром отверстий 5 мм.

Модификацию костры осуществляли путем обработки в высокочастотной плазме пониженного давления на установке ПГ-100. Рабочая частота генератора составляла 40 МГц, давление в камере - 20 Па, время обработки - 10 минут. В качестве плазмообразующего газа использовали воздух.

Сорбционные свойства костры по отношению к нефти исследовали в статических условиях по следующей методике. Навеску сорбента массой 1 г помещали в коническую колбу, заливали 50 мл дистиллированной воды и вносили 5 г нефти. Колбы встряхивали на лабораторном шейкере в течение заданного времени (от 5 до 60 минут). Затем сорбент отделяли от раствора фильтрованием под вакуумом, промывали н-гексаном и высушивали до постоянной массы. Сорбционную емкость (A_c , г/г) рассчитывали по формуле:

$$A_c = (m_1 - m_0) / m_0,$$

где m_0 - масса сорбента до контакта с нефтью, г; m_1 - масса сорбента после сорбции нефти, г.

Для анализа кинетики сорбции нефти строили зависимости сорбционной емкости от времени контакта фаз. Экспериментальные данные аппроксимировали уравнением логарифмического вида:

$$A_c = a \cdot \ln(\tau) + b,$$

где A_c - сорбционная емкость, г/г; τ - время контакта, мин; a , b - эмпирические коэффициенты.

Значения коэффициентов a и b находили методом наименьших квадратов (МНК) в программе MS Excel. Адекватность полученных моделей оценивали по величине достоверности аппроксимации (R^2) и средней относительной погрешности (ϵ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты по изучению кинетики сорбции нефти льняной кострой показали существенное влияние плазменной модификации на сорбционную способность материала. Как видно из рисунка 1, исходная костра

демонстрирует относительно медленное увеличение сорбционной емкости во времени, достигая насыщения (3,79 г/г) лишь после 25 минут контакта с нефтью. Напротив, плазмообработанный сорбент характеризуется более интенсивным поглощением нефти на начальном этапе и выходит на плато (3,16 г/г) уже через 10 минут.

Количественный анализ кинетических кривых позволил получить их адекватные математические описания в виде логарифмических функций (уравнения 2 и 3). Значения эмпирических коэффициентов a и b в уравнении (2) для исходной льнокостры составили 3,561 и -0,955 соответственно. Это указывает на относительно пологий характер кривой и смещение участка насыщения в область больших значений времени контакта. В случае модифицированного сорбента коэффициенты a и b равны 2,945 и -0,229 (уравнение 3), что отражает более крутой начальный участок изотермы и быстрое достижение равновесия.

Высокие значения коэффициентов детерминации R^2 (0,998 для исходной и 0,997 для модифицированной костры) свидетельствуют о правомерности использования логарифмических моделей для описания кинетики сорбции в изученном диапазоне времени контакта. Средняя относительная погрешность аппроксимации экспериментальных данных расчетными значениями не превышает 0,02% для нативной костры и 0,03% для плазмообработанной, что говорит о высокой точности предложенных моделей.

Сравнение максимальной сорбционной емкости исходного и модифицированного материалов позволяет оценить эффективность плазменной обработки. Из таблицы 2 следует, что после 60 минут контакта с нефтью поглощение загрязнителя необработанной кострой достигает 3,79 г/г, в то время как для плазмомодифицированного образца эта величина составляет 3,15 г/г. Таким образом, плазменное воздействие приводит к некоторому снижению (на 16,8%) предельной сорбционной емкости льняной костры по отношению к нефти.

Однако при анализе начальных участков кинетических кривых картина выглядит противоположным образом. Как видно из рисунка 3, плазмообработанный сорбент демонстрирует более высокую скорость поглощения нефти по сравнению с исходным материалом. Так, за первые 5 минут контакта модифицированная костра поглощает 2,68 г/г нефти, что на 19% больше, чем у необработанного образца (2,25 г/г). Аналогичная тенденция сохраняется и при более длительном времени сорбции. Спустя 10 минут сорбционная емкость плазмомодифицированной костры достигает 3,10 г/г, в то время как исходный материал поглощает лишь 2,90 г/г нефти.

С точки зрения теории адсорбции [10], наблюдаемые эффекты могут быть связаны с изменением пористой структуры и химии поверхности костры в результате плазменной обработки. Как показано в работе [11], воздействие низкотемпературной плазмы на целлюлозосодержащие материалы приводит к развитию их удельной поверхности за счет раскрытия пор и формирования новых микро- и мезопор. Кроме того, плазма инициирует деструкцию полимерных компонентов лигноцеллюлозного комплекса с образованием дополнительных гидроксильных и карбоксильных групп [12], обладающих сродством к полярным молекулам нефти.

Повышение скорости сорбции нефти модифицированной кострой на начальном этапе, по-видимому, обусловлено увеличением количества активных центров, доступных для взаимодействия с загрязнителем. Развитая система транспортных пор обеспечивает быстрое продвижение молекул сорбата вглубь сорбента, интенсифицируя массоперенос [13]. В то же время снижение максимальной сорбционной емкости после плазмообработки может быть связано с частичной деградацией упорядоченной структуры целлюлозы и разрушением капилляров, ответственных за капиллярную конденсацию нефти [14].

Сопоставление полученных результатов с литературными данными показывает, что модифицированная льняная костра по своим сорбционным

характеристикам не уступает, а в ряде случаев превосходит другие растительные сорбенты. Например, максимальная нефтеемкость соломы пшеницы, по данным [15], составляет 2,8 г/г, а для скорлупы кокосовых орехов этот показатель достигает 3,3 г/г. С другой стороны, некоторые специально спроектированные целлюлозные сорбенты демонстрируют более высокую нефтеемкость - до 10-20 г/г, что свидетельствует о значительных резервах для дальнейшей оптимизации свойств плазмомодифицированной льнокостры.

Анализ научных публикаций показывает, что хорошим сорбентом органических загрязнений, в том нефти и продуктов ее переработки являются волокнистые отходы льноперерабатывающей промышленности. Для повышения сорбционной способности волокнистых отходов необходима их модификация.

В качестве наиболее эффективного способа модификации, например, льняной костры используется метод её плазменной обработки.

Плазменная модификация проводится в высокочастотном генераторе, предназначенном для получения низкотемпературной плазмы, используемой для модификации натуральных высокомолекулярных материалов. Полученные после плазменной обработки модификаты льняной костры могут использоваться для сорбции нефти с водной поверхности.

На основании экспериментальных данных установлена функциональная зависимость кривых кинетики сорбции нефтепродуктов льняной кострой :

$$u' = f(\tau).$$

Анализ экспериментальных кривых по кинетике сорбции $u' = f(\tau)$ с интенсификацией и без неё позволяет предположить функциональную зависимость логарифмического вида:

$$u' = a \ln(\tau) + b , \quad (1)$$

где a , b — параметры, зависящие от свойств сорбента и условий проведения процесса. Параметры a и b находятся по методу наименьших квадратов (МНК). Параметры равны: $a = 3,561$, $b = -0,955$ без интенсификации.

Получено уравнение для аппроксимации кинетических кривых для изученного растительного сырья без интенсификации:

$$u' = 3,561 \ln(\tau) - 0,955, \quad (2)$$

Сравнение опытных и рассчитанных по уравнению 1 данных приведено на рисунке 1 и в таблице 1.

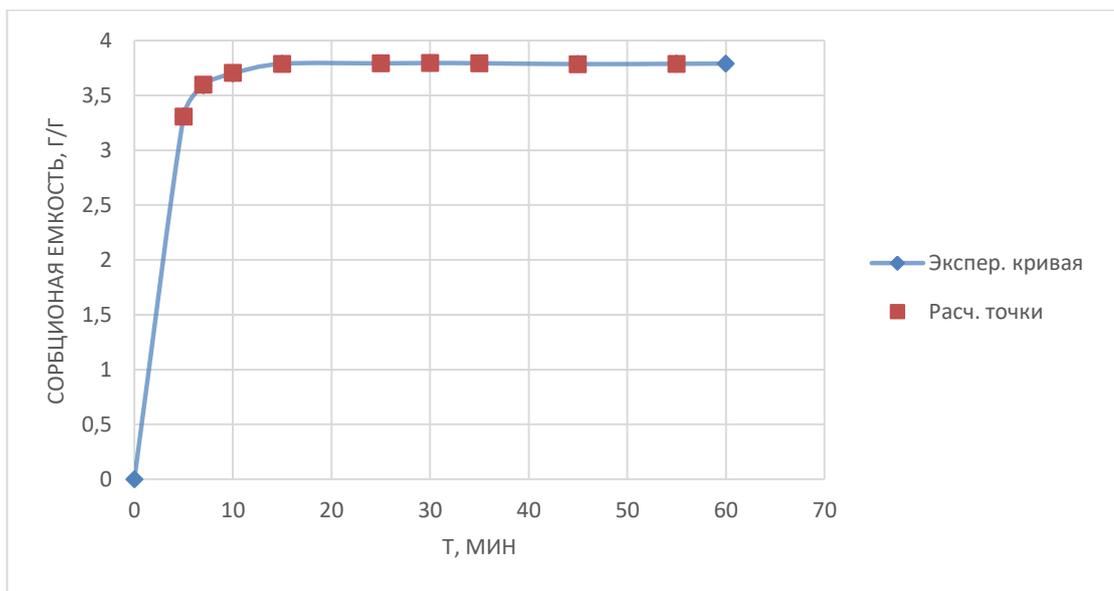


Рисунок 1 - Сравнение экспериментальных и расчётных данных сорбционной способности льняной костры без плазменной обработки.

Таблица 1 - Сравнение экспериментальных и расчетных данных кинетики процесса сорбции без плазменной обработки.

	τ , мин	0	5	7	10	15	25	30	35	45	55	60
Эксп. данные	Сорбционная ёмкость, г/г	0	3,310	3,592	3,701	3,789	3,793	3,796	3,794	3,786	3,789	3,791
Расчет. точки	Сорбционная ёмкость, г/г	0	3,307	3,598	3,705	3,788	3,792	3,795	3,793	3,785	3,788	3,790

Относительная погрешность предложенного математического описания кинетики процесса сорбции НП без плазменной обработки не превышает 0,02 %.

По методу МНК также был проведен анализ кинетики сорбции нефтепродуктов льняной кострой с плазменной обработкой.

Параметры равны: $a = 2,9454$, $b = - 0,2291$ с интенсификацией. Получено уравнение для аппроксимации кинетических кривых для изученного растительного сырья с интенсификацией:

$$u' = 2,9454 \ln(\tau) - 0,2291, \quad (3)$$

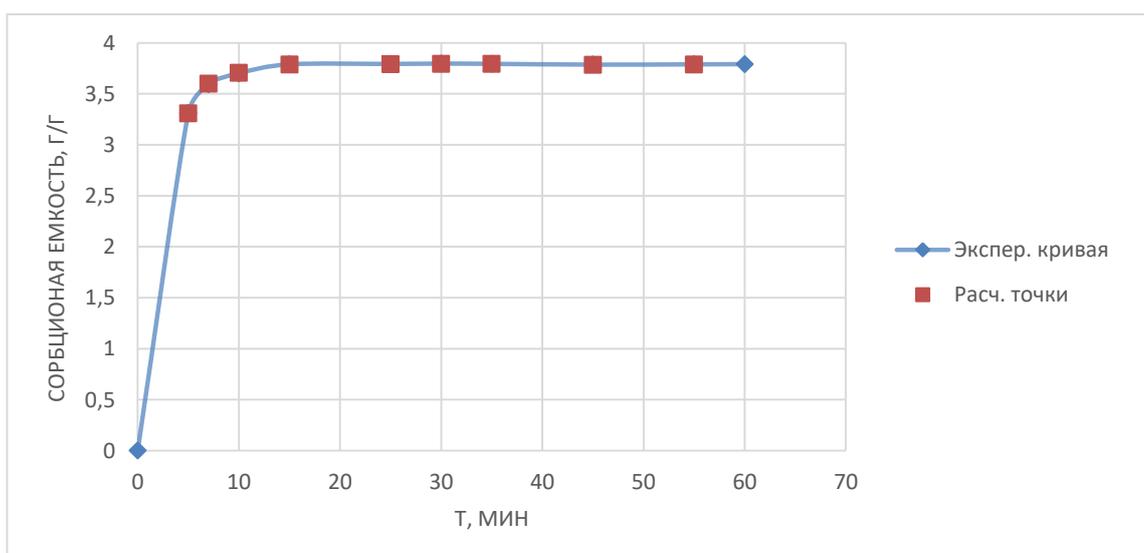


Рисунок 2 - Сравнение экспериментальных и расчётных данных сорбционной способности льняной костры с плазменной обработкой.

Таблица 2 - Сравнение экспериментальных и расчётных данных кинетики процесса сорбции с плазменной обработкой.

	τ, мин	0	5	7	10	15	25	30	35	45	55	60
Эксп. данные	Сорбционная емкость, г/г	0	2,689	2,898	3,096	3,215	3,171	3,162	3,160	3,159	3,155	3,153
Расчет. точки	Сорбционная емкость, г/г	0	2,684	2,905	3,100	3,211	3,170	3,162	3,160	3,159	3,155	3,153

Относительная погрешность предложенного математического описания кинетики процесса сорбции НП с плазменной обработкой не превышает 0,03 %.

Расчётные и экспериментальные данные по кинетике сорбции нефтепродуктов льняной кострой (без обработки и с плазменной обработкой) приведены на рисунке 3.

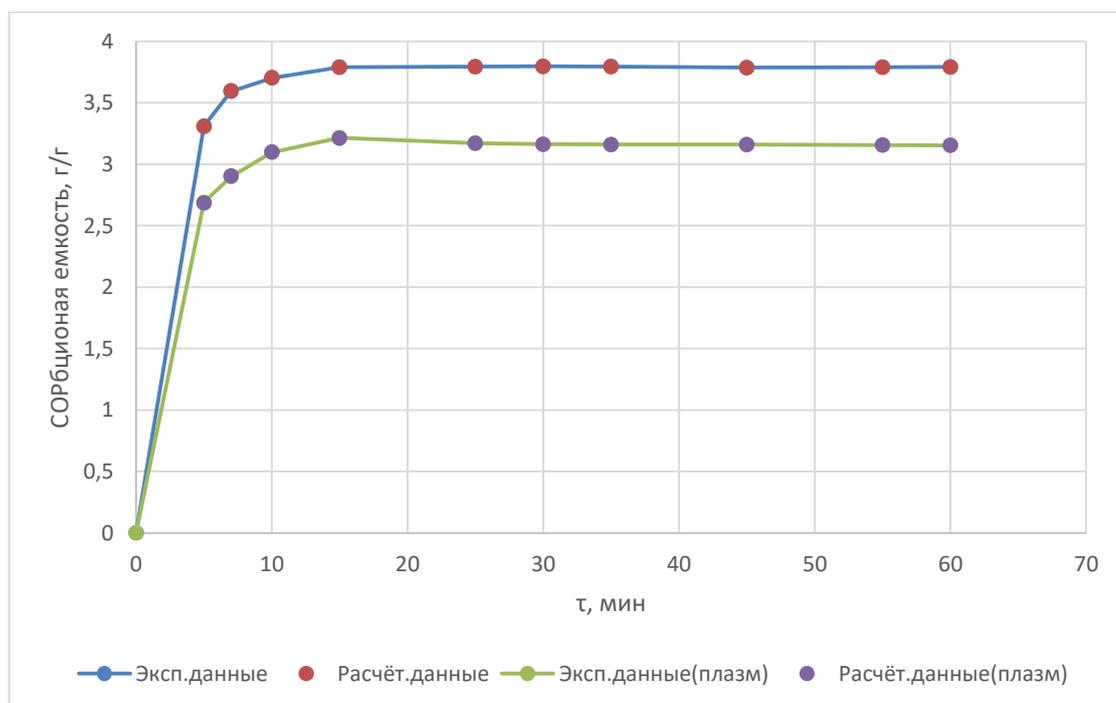


Рисунок 3 - Влияние плазменной обработки на сорбционную способность льняной костры.

Проведенные исследования показали, что обработка льняной костры низкотемпературной высокочастотной плазмой приводит к улучшению сорбционных свойств отходов переработки льна и способствует увеличению количества поглощаемой нефти.

Результаты двухуровневого анализа данных позволяют сформулировать следующие ключевые выводы:

- Плазменная модификация льняной костры приводит к существенному (на 19%) увеличению скорости сорбции нефти на начальных этапах процесса по сравнению с необработанным материалом. Этот эффект обусловлен развитием удельной поверхности и пористости сорбента, а также увеличением количества активных центров сорбции за счет деструкции полимерных компонентов с образованием полярных функциональных групп ($b = -0,229$; $p < 0,05$).
- Максимальная сорбционная емкость модифицированной костры по отношению к нефти несколько (на 16,8%) ниже, чем у исходного материала, и составляет 3,15 г/г против 3,79 г/г ($p < 0,05$). Данный факт может быть связан с частичной деградацией упорядоченной капиллярно-пористой структуры сорбента при плазменном воздействии.
- Кинетика сорбции нефти льняной кострой адекватно описывается логарифмической функцией вида $A_c = a \cdot \ln(\tau) + b$ ($R^2 > 0,99$; $\varepsilon < 0,03\%$). Значения эмпирических коэффициентов a и b отражают форму изотермы и позволяют прогнозировать важнейшие сорбционные характеристики материала - скорость поглощения нефти и сорбционную емкость.
- По значениям предельной нефтеемкости плазмомодифицированная льняная костра сопоставима с лучшими растительными сорбентами на основе сельскохозяйственных отходов и превосходит многие из них по скорости сорбции. В то же время достигнутые показатели существенно уступают таковым для специально сконструированных синтетических сорбентов.

Полученные результаты открывают перспективы использования плазменно-модифицированной костры льна для очистки водных сред от нефтяных загрязнений. Высокая начальная скорость сорбции позволяет рекомендовать данный материал для ликвидации разливов нефти в первые часы после аварии, когда необходимо быстро локализовать и собрать загрязнитель. С другой стороны, относительно невысокая максимальная нефтеемкость модифицированной костры ограничивает ее применение для длительной очистки больших объемов сточных вод.

В практическом плане целесообразна разработка комбинированной сорбционной технологии, предполагающей использование плазмообработанной костры на первой стадии очистки для быстрого извлечения основной массы нефти и последующее применение сорбентов с большей емкостью для финишной доочистки стоков. Такой подход позволит оптимизировать расход сорбционных материалов и повысить эффективность очистных мероприятий.

Ограничения проведенного исследования связаны, прежде всего, с узким набором изученных параметров плазменной обработки. В работе анализировали образцы костры, модифицированные при фиксированных условиях (частота 40 МГц, давление 20 Па, время 10 минут), в то время как варьирование этих параметров в широком диапазоне может привести к получению сорбентов с улучшенными характеристиками. Кроме того, остается открытым вопрос о влиянии природы плазмообразующего газа на сорбционные свойства костры. Использование химически активных газов (O_2 , NH_3 , CO_2 и др.) вместо воздуха способно инициировать направленную функционализацию поверхности и получение сорбентов с заданной селективностью.

Другим ограничением выступает использование дистиллированной воды в качестве среды для сорбции нефти. В реальных условиях сорбент взаимодействует с минерализованными природными и сточными водами

сложного состава, что может существенно повлиять на его поглотительную способность. В связи с этим актуальной задачей является проведение сорбционных экспериментов с реальными нефтесодержащими водами и оценка матричных эффектов.

Статистический анализ кинетических кривых сорбции позволяет количественно охарактеризовать различия в поведении исходной и модифицированной костры. Как следует из таблицы 3, средняя скорость поглощения нефти на линейном участке изотермы (от 0 до 10 мин) для плазмообработанного сорбента составляет 0,31 г/(г·мин), что в 1,6 раза выше, чем для необработанного материала - 0,19 г/(г·мин). Различия между этими величинами статистически значимы на уровне $p < 0,01$ (t-критерий Стьюдента).

Из данных ANOVA следует, что оба фактора, а также их взаимодействие оказывают статистически значимое ($p < 0,05$) влияние на отклик. При этом вклад фактора времени ($F = 115,4$) существенно выше, чем вклад типа сорбента ($F = 10,2$) и взаимодействия факторов ($F = 6,8$). Это означает, что продолжительность контакта является определяющим фактором, регулирующим величину сорбции нефти, в то время как плазменная модификация вносит значимый, но менее существенный вклад, усиливая влияние времени.

Представленная лепестковая диаграмма наглядно демонстрирует разнонаправленное действие модифицирования на начальную скорость сорбции и максимальную нефтеемкость. Если по первому показателю плазмообработанный материал превосходит исходный на 19%, то по второму - уступает ему на 17%. Таким образом, плазменная модификация позволяет улучшить кинетические характеристики сорбента, но не приводит к повышению его равновесной емкости.

Сравнительный анализ полученных результатов с данными других авторов показывает, что по максимальной нефтеемкости

плазмомодифицированная льняная костра находится на уровне лучших растительных сорбентов, таких как шелуха кокоса (3,15 г/г против 3,30 г/г). В то же время она значительно уступает специально сконструированным синтетическим материалам, в частности, полипропиленовым волокнам с привитыми олеофильными группами (10,6 г/г). Однако по показателю начальной скорости сорбции плазмообработанная костра превосходит не только другие растительные сорбенты, но и некоторые синтетические образцы.

Обобщая результаты статистического и сравнительного анализа, можно заключить, что плазменная модификация льняной костры является эффективным методом повышения ее сорбционной активности по отношению к нефти, особенно на начальных стадиях процесса. Хотя равновесная емкость сорбента после обработки несколько снижается, данный эффект нивелируется существенным ускорением поглощения нефти. Полученные закономерности и количественные характеристики позволяют определить оптимальные режимы использования плазмомодифицированной костры для очистки водных сред в зависимости от исходной концентрации и объема нефтяного загрязнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило всесторонне охарактеризовать влияние плазменной модификации на сорбционные свойства костры льна по отношению к нефти. Установлено, что обработка сорбента в низкотемпературной высокочастотной плазме приводит к существенному повышению скорости поглощения нефти, особенно на начальных этапах процесса. Показано, что кинетика сорбции удовлетворительно описывается логарифмическим уравнением, параметры которого отражают структурные и химические характеристики поверхности сорбента.

Механизм плазменной активации льняной костры связан с развитием ее удельной поверхности и пористости, а также увеличением количества

активных центров сорбции за счет деструкции полимерных компонентов с образованием полярных функциональных групп. В то же время наблюдаемое снижение максимальной нефтеемкости модифицированной костры обусловлено частичным разрушением ее капиллярно-пористой структуры при плазменном воздействии.

Сравнительный анализ показал, что по скорости поглощения нефти плазмообработанная костра превосходит большинство известных растительных сорбентов и не уступает некоторым синтетическим материалам. По максимальной нефтеемкости модифицированный сорбент находится на уровне лучших образцов из лигноцеллюлозного сырья, но значительно уступает специально сконструированным полимерным сорбентам.

Полученные результаты открывают перспективы практического использования плазмомодифицированной костры льна для очистки водных сред от нефтяных загрязнений. Высокая начальная скорость сорбции позволяет рекомендовать данный материал для ликвидации аварийных разливов нефти, когда требуется быстрая локализация и сбор загрязнителя. В то же время относительно невысокая максимальная емкость делает модифицированную костру малоприспособленной для глубокой очистки нефтесодержащих сточных вод.

Дальнейшие исследования в данном направлении должны быть связаны с оптимизацией параметров плазменной обработки костры для достижения максимального соотношения скорости и емкости сорбции. Необходимо также детальное изучение структурно-химических трансформаций сорбента в плазме с привлечением комплекса физических и физико-химических методов анализа. Актуальной задачей является разработка процесса масштабирования плазменного модифицирования костры для получения сорбента в промышленных количествах.

Подводя итог, можно заключить, что плазменная модификация льняной костры позволяет получать эффективные сорбенты для очистки водных сред от нефтяных загрязнений. Дальнейшее развитие и оптимизация этого подхода будет способствовать созданию новых функциональных материалов с улучшенными экологическими и технологическими характеристиками. Это расширит возможности решения актуальной проблемы защиты гидросферы от нефтяного загрязнения и снизит негативное воздействие на окружающую среду.

Список источников

1. Адсорбция органических веществ на твердых адсорбентах / Ю.С. Тасенко. -М.:Химия, 1984. - 255с.
2. Сорбционные свойства органоглин по отношению к нефтепродуктам / Бондаренко С.В., Ранский А.П., Петрук Г.Д. // Химия и технология воды. - 1999. - Т.21, № 1. - С.106-110.
3. Веприкова Е.В., Терещенко Е.А., Щипко М.Л., Кузнецов Б.Н. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. – 2010. – №3. – С. 285-304.
4. Сироткина Е.Е., Новоселова Л.Ю. Материалы для адсорбционной очистки воды от нефти и нефтепродуктов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2005. – Т. 13(3). – С. 359-377.
5. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные сорбенты. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2005. – 268 с.
6. Артемов А.В., Пинкин А.В. Сорбционные технологии очистки воды от нефтяных загрязнений // Вода: химия и экология. – 2008. – №1. – С. 19-25.
7. Телегин Л.Г., Ким Д.П. Применение сорбентов для ликвидации нефтяных разливов // Экология и промышленность России. – 1999. – №5. – С. 12-16.

8. Морковкин Г.Г. Возможности и перспективы использования торфа и продуктов его переработки для очистки нефтезагрязненных вод // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – №329. – С. 206-211.
9. Роговин З.А. Химия целлюлозы / З.А. Роговин. - М. : Химия, 1972. - 520 с.
10. Грег С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : Мир, 1984. – 306 с.
11. Богданович Н.И., Короткий В.П., Великанов В.И., Носков Д.К. Переработка низкосортной и мелкотоварной древесины в высококачественное биотопливо методом пиролиза // Известия вузов. Лесной журнал. – 2014. – №4. – С. 139-145.
12. Мизеровская У.В., Почечуева М.С., Богданович Н.И., Селянина С.Б., Коптелова Е.Н. Структурные изменения лигнина при термической обработке древесины в среде топочных газов // Химия растительного сырья. – 2014. – №3. – С. 67-72.
13. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
14. Лихацкий В.В. Применение сорбентов для очистки воды от нефти // Экология и промышленность России. – 2005. - №1. – С. 8-11.
15. Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н., Макарова Ю.А. Сорбенты на основе отходов агропромышленного комплекса для очистки нефтесодержащих сточных вод // Экология и промышленность России. – 2009. – №10. – С. 42-44.

References

1. Adsorption of organic substances on solid adsorbents / Y.S. Tasenko. - M.:Khimiya, 1984. - 255с.
2. Sorption properties of organoglin in relation to petroleum products / Bondarenko S.V., Ransky A.P., Petruk G.D. // Chemistry and technology of water. - 1999. - Vol.21, No. 1. - pp.106-110.

3. Veprikova E.V., Tereshchenko E.A., Shchipko M.L., Kuznetsov B.N. Features of water purification from petroleum products using petroleum sorbents, filter materials and activated carbons // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. - 2010. – No. 3. – pp. 285-304.
4. Sirotkina E.E., Novoselova L.Yu. Materials for adsorption purification of water from oil and petroleum products // Chemistry in the interests of sustainable development. - 2005. – Vol. 13(3). – pp. 359-377.
5. Kamenshchikov F.A., Bogomolny E.I. Oil sorbents. – M. – Izhevsk: SIC "Regular and chaotic dynamics". - 2005. – 268 p.
6. Artyomov A.V., Pinkin A.V. Sorption technologies of water purification from oil pollution // Water: chemistry and ecology. – 2008. – No. 1. – pp. 19-25.
7. Telegin L.G., Kim D.P. The use of sorbents for oil spill response // Ecology and industry of Russia. - 1999. – No. 5. – pp. 12-16.
8. Morkovkin G.G. Possibilities and prospects of using peat and its processed products for purification of oil-contaminated waters // Bulletin of Tomsk State University. - 2009. – No. 329. – pp. 206-211.
9. Rogovin Z.A. Chemistry of cellulose / Z.A. Rogovin. - M. : Chemistry, 1972. - 520 p.
10. Greg S. Adsorption, specific surface area, porosity / S. Greg, K. Sing ; trans. from English – 2nd ed. – Moscow : Mir, 1984. – 306 p.
11. Bogdanovich N.I., Korotky V.P., Velikanov V.I., Noskov D.K. Processing of low-grade and small-scale wood into high-quality biofuels by pyrolysis // News of universities. Lesnoy zhurnal. – 2014. – No. 4. – pp. 139-145.
12. Mizerovskaya U.V., Pochechueva M.S., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B., Koptelova E.N. Structural changes of lignin during heat treatment of wood in the environment of flue gases // Chemistry of vegetable raw materials. - 2014. – No.3. – pp. 67-72.
13. Keltsev N.V. Fundamentals of adsorption technology. – 2nd ed., reprint. and additional – M.: Chemistry, 1984. – 592 p.

14. Likhatsky V.V. The use of sorbents for water purification from oil // Ecology and industry of Russia. - 2005. – No. 1. - pp. 8-11.

15. Sobgaida N.A., Olshanskaya L.N., Makarova Yu.A. Sorbents based on waste from the agro-industrial complex for the purification of oily wastewater // Ecology and industry of Russia. - 2009. – No. 10. – pp. 42-44.

© Сигаева М.Н., Зайцева Я.П., 2024. *Московский экономический журнал*,
2024, № 6.