

Статья поступила в редакцию: 23.07.2026

Статья принята к публикации: 28.07.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 628.3+661.9

Синтез многофункционального композитного сорбента-коагулянта на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника и механизм очистки сточных вод

Раззақов Ҳасан Қаландарович

канд. техн. наук, проф., проф.

кафедры химии и нефтегазовой технологии Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: s.i.nazarov@buxdu.uz

Аскарлова Гулчиroy Ахрор кизи

магистрант

Бухарский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Synthesis of a multifunctional composite sorbent-coagulant based on Shafirkan bentonite and cotton-stalk biochar and the mechanism of wastewater treatment

Razzaqov Hasan Qalandarovich

professor, Candidate of Technical Sciences, Professor

of the Department of Chemistry and Oil and Gas Technology, Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Askarova Gulchiroy Ahror qizi

master's student of Bukhara State University

Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Цель работы состояла в получении многофункционального композитного материала, одновременно проявляющего сорбционные и коагулирующие свойства, и в установлении механизма его действия при очистке сточных вод текстильных и нефтегазовых предприятий. Композит синтезировали пропиткой активированного биоугля стеблей хлопчатника и термически обработанного шафирканского бентонита кислым раствором солей железа(III) и алюминия с последующим прокаливанием при 350 °С. Текстульные и структурные характеристики определяли методами низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ), рентгенофазового анализа, ИК-Фурье-спектроскопии и растровой электронной микроскопии. Установлено, что при соотношении *бентонит: биоуголь* 2:1 и концентрации активаторов 10 % достигается удаление метиленового синего на 97,8 %, нефтепродуктов — на 93,4 %.

Библиографическое описание: Раззақов Ҳ.Қ., Аскарлова Г.А. кизи Синтез многофункционального композитного сорбента-коагулянта на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника и механизм очистки сточных вод // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://universum.com/ru/tech/archive/item/23240>

Предельная сорбционная ёмкость по модели Ленгмюра составила 128,2 мг/г; кинетика описывается уравнением псевдвторого порядка. Показана устойчивость материала в пяти циклах регенерации.

Abstract

The aim of the study was to obtain a multifunctional composite material combining sorption and coagulation properties and to establish the mechanism of its action in the treatment of wastewater from textile and oil-and-gas enterprises. The composite was synthesised by impregnating activated cotton-stalk biochar and thermally treated Shafirkan bentonite with an acidic solution of iron(III) and aluminium salts, followed by calcination at 350 °C. Textural and structural characteristics were determined by low-temperature nitrogen adsorption (BET), X-ray diffraction, FTIR spectroscopy and scanning electron microscopy. At a bentonite-to-biochar ratio of 2:1 and an activator concentration of 10 %, methylene blue removal reached 97.8 % and oil product removal 93.4 %. The Langmuir maximum sorption capacity was 128.2 mg/g, and the kinetics followed the pseudo-second-order equation. The material remained stable over five regeneration cycles.

Ключевые слова: бентонит, биоуголь, стебли хлопчатника, композитный сорбент-коагулянт, пилларинг, адсорбция, коагуляция, сточные воды, изотерма Ленгмюра, регенерация.

Keywords: bentonite, biochar, cotton stalks, composite sorbent-coagulant, pillaring, adsorption, coagulation, wastewater, Langmuir isotherm, regeneration.

Введение

Самым сложным направлением очистки промышленных сточных вод является удаление загрязнителей различной природы, поскольку текстильные и нефтегазовые предприятия формируют стоки с разными физико-химическими характеристиками. Текстильные сточные воды содержат устойчивые органические красители и характеризуются высокой цветностью и значительным содержанием органических веществ, тогда как нефтегазовые воды содержат эмульгированные нефтепродукты, механические примеси и взвешенные частицы [13; 15]. Для удаления таких компонентов обычно применяются сорбционные и коагуляционно-флокуляционные методы, эффективность которых определяется свойствами используемых материалов и механизмами взаимодействия загрязнителей с поверхностью сорбентов [5; 7–9; 14].

Перспективными материалами для очистки сточных вод являются природные глинистые минералы и углеродные сорбенты. Bentonитовые глины на основе монтмориллонита обладают высокой доступностью, катионообменной способностью и химической устойчивостью, однако их сорбционные характеристики ограничены вследствие недостаточной развитости пористой структуры [3; 4]. В то же время биоуголь, получаемый пиролизом растительных отходов, отличается развитой поверхностью и эффективностью удаления органических соединений, но практически не обладает коагулирующими свойствами [10; 13; 15].

Одним из эффективных способов улучшения свойств бентонита является его модификация полигидрохсокомплексами железа и алюминия, позволяющая увеличить межслоевое пространство минерала и сформировать активные центры коагуляции [6; 11]. Объединение модифицированного бентонита с биоуглём в составе единого композита создаёт возможность получения материала двойного действия, способного одновременно удалять растворённые органические вещества, нефтепродукты и дисперсные примеси. Однако влияние состава композита, концентрации активирующих компонентов и условий получения на его эксплуатационные свойства изучено недостаточно [3; 12].

Республика Узбекистан обладает значительными запасами бентонитовых глин, включая Шафирканское месторождение Бухарской области, а также большими объёмами отходов хлопководства, пригодных для получения биоугля. Использование местного сырья позволяет снизить стоимость очистных материалов и повысить экологическую эффективность их применения. В связи с этим целью настоящей работы является получение композитного сорбента-коагулянта на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника, изучение влияния условий модификации и термообработки на его свойства, а также оценка эффективности применения при очистке сточных вод промышленных предприятий [1].

Материалы и методы исследования

Бентонит Шафирканского месторождения измельчали (<0,25 мм) и термообрабатывали при 200 °С. Стебли хлопчатника сушили, измельчали и подвергали пиролизу при 450 °С в бескислородной среде с выходом биоугля 28,6 %. Композит синтезировали смешением бентонита и биоугля с растворами FeCl_3 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ при $\text{Fe} = 1:1$ и pH 2,0–3,0. Смесь перемешивали в течение 18 часов, фильтровали, сушили при 105 °С и подвергали термообработке. Параметры синтеза представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Условия синтеза серии композитных образцов

Образец	Бентонит : био- уголь, масс.	Концентрация ак- тиваторов, %	Температура про- каливания, °С	Продолжительность прокаливания, ч
КСК-1	1:1	10	350	1,5
КСК-2	2:1	10	350	1,5
КСК-3	3:1	10	350	1,5
КСК-4	4:1	10	350	1,5
КСК-5	5:1	10	350	1,5
КСК-2а	2:1	5	350	1,5
КСК-2б	2:1	15	350	1,5
КСК-2в	2:1	10	300	1,0
КСК-2г	2:1	10	400	2,0

Методы исследования материала. Структурные характеристики композита определяли методом низкотемпературной адсорбции азота (77 К) по модели БЭТ и методом ВЖН. Фазовый состав исследовали рентгенофазовым анализом, функциональные группы поверхности — ИК-Фурье спектроскопией, морфологию и элементный состав —

электронной микроскопией с энергодисперсионным анализом. Сорбционные свойства изучали в статических условиях с использованием раствора метиленового синего. Концентрацию красителя определяли фотоколориметрически, нефтепродукты — ИК-методом, мутность и ХПК — стандартными аналитическими методами. Все эксперименты выполняли в трёх повторностях.

Степень очистки (η , %) и сорбционную ёмкость (q , мг/г) рассчитывали по уравнениям (1) и (2):

$$\eta = (C_0 - C) / C_0 \cdot 100 \% \quad (1)$$

$$q = (C_0 - C) \cdot V / m \quad (2)$$

где C_0 и C — исходная и равновесная концентрации загрязнителя, мг/л; V — объём раствора, л; m — масса сорбента, г.

Кинетику описывали моделями псевдопервого (ППП) и псевдвторого (ПВП) порядка, равновесие — уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха [5; 8; 9]. Адекватность моделей оценивали по коэффициенту детерминации R^2 и по расхождению расчётной и экспериментальной ёмкостей.

Реальные сточные воды. Испытания проводили на пробах сточных вод текстильного предприятия и площадке подготовки нефти Бухарской области. Дозу композита варьировали в пределах 0,5–3,0 г/л, продолжительность контакта — 60 минут, отстаивание — 30 минут.

Результаты и обсуждение

Текстурные характеристики композитов

Исходный шафирканский бентонит характеризуется удельной поверхностью 62 м²/г, что типично для природных монтмориллонитовых глин. Пиролиз стеблей хлопчатника с последующей активацией обеспечивает получение биоугля с поверхностью 415 м²/г. Введение бентонита в углеродную матрицу закономерно снижает суммарную удельную поверхность композита (рис. 1), однако одновременно формирует ионообменные центры и резервуар катионов-коагулянтов.

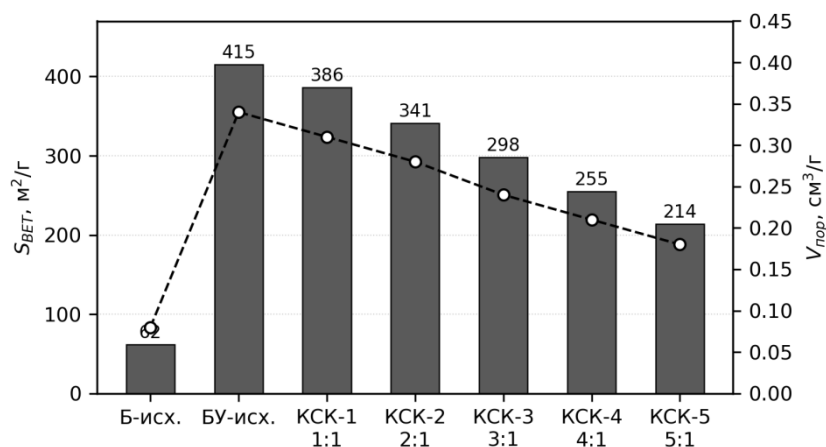


Рисунок 1. Удельная поверхность (столбцы) и суммарный объем пор (линия) исходных компонентов и композитов различного состава

Данные рентгенофазового анализа и результаты низкотемпературной адсорбции азота обобщены в таблице 2. Смещение базального рефлекса $d(001)$ монтмориллонита от 1,24 до 1,68 нм подтверждает внедрение полигидрохсокомплексов железа и алюминия в межслоевое пространство и образование столбчатой структуры. На дифрактограммах прокалённых образцов дополнительно фиксируются слабые рефлексы, отвечающие рентгеноаморфным оксигидроксидам железа; отсутствие интенсивных линий кристаллического гематита свидетельствует о высокой дисперсности закреплённой фазы.

Таблица 2.

Структурно-текстурные характеристики исходных компонентов и композитов

Образец	$S(ВЕТ)$, м²/г	V пор, см³/г	D пор, нм	$d(001)$, нм	Содержание Fe + Al, масс. %
Бентонит исходный	62	0,08	6,4	1,24	—
Биоуголь исходный	415	0,34	3,3	—	—
КСК-1 (1:1)	386	0,31	3,2	1,62	6,8
КСК-2 (2:1)	341	0,28	3,4	1,68	9,1
КСК-3 (3:1)	298	0,24	3,5	1,66	10,4
КСК-4 (4:1)	255	0,21	3,6	1,61	11,2
КСК-5 (5:1)	214	0,18	3,8	1,58	11,9

ИК-спектры композитов содержат полосы при 1035 см^{-1} (Si–O–Si силикатного каркаса), 915 и 795 см^{-1} (Al–OH–Al и Si–O–Al), 3620 см^{-1} (структурные OH-группы). Полосы 560 – 470 см^{-1} относят к колебаниям Fe–O и Al–O вновь образованной оксидной фазы. Сохранение полос 1580 и 1710 см^{-1} (ароматические C=C и карбоксильные C=O группы) указывает на то, что при выбранном режиме прокаливания углеродная матрица не выгорает. Микрофотографии РЭМ показывают закрепление глобулярных частиц размером 40–90 нм на стенках транспортных пор биоугля и на торцах силикатных пакетов.

Влияние состава композита на эффективность очистки

Зависимость эффективности удаления загрязнителей от соотношения *бентонит: биоуголь* имеет отчётливо выраженный экстремальный характер (рис. 2). Удаление красителя достигает максимума при соотношении 2:1, поскольку в этой области сохраняется достаточно развитая пористая структура углеродной фазы при уже сформированных ионообменных центрах. Показатели удаления нефтепродуктов и мутности продолжают расти до соотношения 3:1, что объясняется увеличением содержания катионов-гидролизаторов и, соответственно, коагулирующей способности материала.

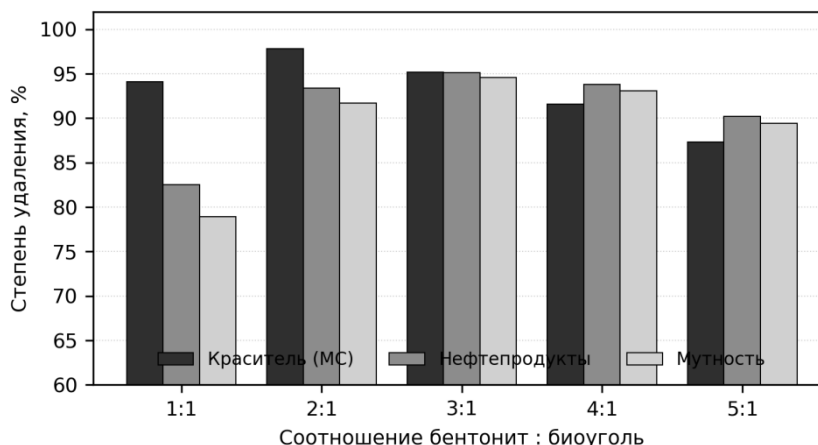


Рисунок 2. Влияние соотношения бентонит: биоуголь на степень удаления загрязнителей (доза 1 г/л, pH 7, время контакта 60 мин.)

Компромиссным по совокупности показателей признан образец КСК-2 (соотношение 2:1), обеспечивающий удаление красителя на 97,8 % при удалении нефтепродуктов 93,4 % и мутности 91,7 %. Дальнейшее увеличение доли бентонита нецелесообразно: при соотношении 5:1 сокращение удельной поверхности до 214 м²/г приводит к падению сорбции красителя более чем на 10 процентных пунктов.

Концентрация активаторов и режим прокаливания также существенно влияют на функциональные свойства (табл. 3). При содержании солей 5 % количество закреплённых катионов недостаточно для формирования устойчивой коагулирующей фазы. Повышение концентрации до 15 % вызывает частичную блокировку пор избыточным оксигидроксидом: удельная поверхность снижается на 15 %, а прирост эффективности отсутствует. Прокаливание при 300 °С не обеспечивает полного перехода гидроксидов в закреплённую оксидную форму, вследствие чего вымывание железа в раствор достигает 0,21 мг/л. При 400 °С наблюдается частичное выгорание углеродной составляющей и уменьшение сорбционной ёмкости.

Таблица 3.

Влияние концентрации активаторов и режима прокаливания на свойства композита (основа — соотношение 2:1)

Образец	Конц. активаторов, %	Режим, °С / ч	Удаление МС, %	Удаление нефте-продуктов, %	Вымывание Fe в фильтрат, мг/л
КСК-2а	5	350 / 1,5	92,4	88,1	0,04

Образец	Конц. активаторов, %	Режим, °С / ч	Удаление МС, %	Удаление нефте-продуктов, %	Вымывание Fe в фильтрат, мг/л
КСК-2	10	350 / 1,5	97,8	93,4	0,09
КСК-2б	15	350 / 1,5	95,6	92,0	0,18
КСК-2в	10	300 / 1,0	94,1	89,7	0,21
КСК-2г	10	400 / 2,0	93,0	91,5	0,05

Таким образом, оптимальными условиями синтеза следует считать соотношение *бентонит: биоуголь* 2:1, суммарную концентрацию активаторов 10 % и прокаливание при 350 °С в течение 1,5 ч. Величина вымывания железа при этих условиях (0,09 мг/л) остаётся ниже предельно допустимой концентрации для сбрасываемых вод, что важно с точки зрения вторичного загрязнения.

Влияние pH среды

Кислотность среды определяет как заряд поверхности композита, так и форму существования гидролизованых катионов (рис. 3). В сильнокислой области (pH 2–3) поверхность материала заряжена положительно, а гидролиз Fe^{3+} и Al^{3+} подавлен, поэтому оба механизма реализуются слабо. Точка нулевого заряда композита КСК-2, определённая методом дрейфа pH, составила 6,4. При pH выше этого значения поверхность приобретает отрицательный заряд, что усиливает электростатическое притяжение катионного красителя и объясняет максимум сорбции при pH 6–8.

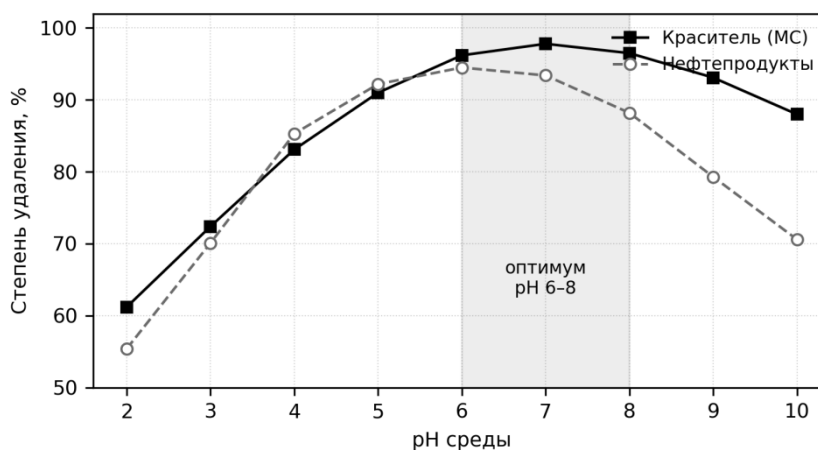


Рисунок 3. Влияние pH на степень удаления метиленового синего и нефтепродуктов (доза 1 г/л, время контакта 60 мин.)

Коагуляционная составляющая наиболее эффективна при pH 5–7, когда преобладают полиядерные гидроксокомплексы с высоким положительным зарядом, нейтрализующие заряд эмульгированных нефтяных капель. В щелочной области (pH ≥ 9) образуются анионные формы $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, коагулирующее действие ослабевает, и удаление нефтепродуктов снижается до 70–79 %. Совмещение обоих механизмов достигается в интервале pH 6–8, который практически совпадает с реакцией большинства производственных стоков и не требует предварительного подкисления.

Кинетика и равновесие сорбции

Кинетические кривые (рис. 4, а) показывают, что около 80 % равновесной ёмкости достигается за первые 20 минут контакта, а равновесие устанавливается через 90 минут. Быстрая начальная стадия отвечает показателю сорбции на легкодоступных внешних центрах, последующее замедление связано с диффузией молекул красителя в мезопористой структуре.

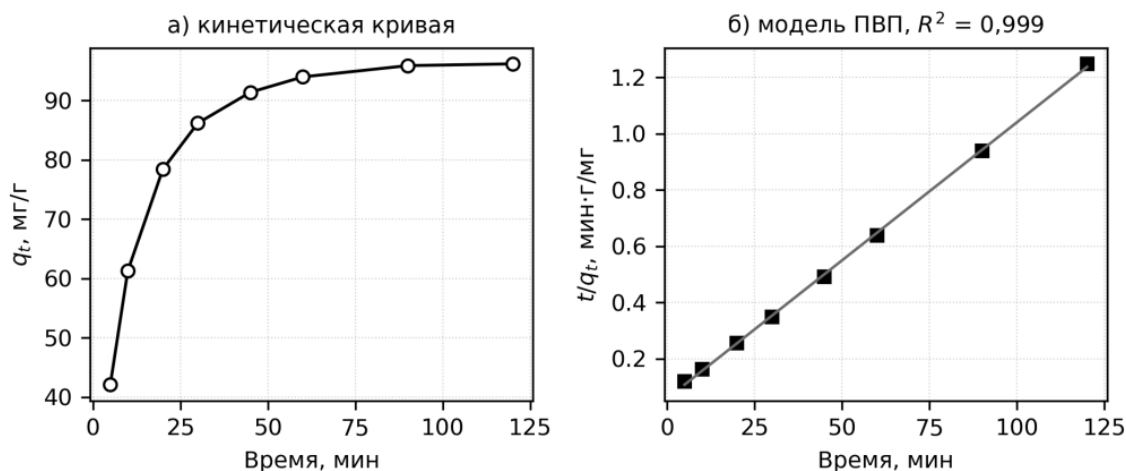


Рисунок 4. Кинетика сорбции метиленового синего композитом КСК-2: а) экспериментальная кривая; б) линейаризация в координатах модели псевдвторого порядка

Результаты обработки экспериментальных данных кинетическими и равновесными моделями приведены в таблице 4. Модель псевдвторого порядка описывает процесс существенно точнее ($R^2 = 0,999$), а расчётная ёмкость 98,0 мг/г практически совпадает с экспериментальной 96,2 мг/г, что указывает на определяющую роль хемосорбционного взаимодействия. Равновесные данные лучше согласуются с уравнением Ленгмюра, то есть сорбция протекает преимущественно на энергетически однородных центрах с образованием монослоя.

Таблица 4.

Параметры кинетических и равновесных моделей сорбции для образца КСК-2

Модель	Параметр	Метиленовый синий	Нефтепродукты
Псевдопервого порядка	$k_1, \text{мин}^{-1} / R^2$	0,041 / 0,962	0,038 / 0,948
Псевдвторого порядка	$k_2, \text{г}/(\text{мг} \cdot \text{мин}) / R^2$	0,0021 / 0,999	0,0026 / 0,997
Псевдвторого порядка	$q(\text{расч.}), \text{мг}/\text{г}$	98,0	74,1
Эксперимент	$q(\text{эксп.}), \text{мг}/\text{г}$	96,2	72,8
Ленгмюра	$q(\text{max}), \text{мг}/\text{г}$	128,2	96,5
Ленгмюра	$K(L), \text{л}/\text{мг} / R^2$	0,086 / 0,996	0,074 / 0,991
Фрейндлиха	$K(F) / n / R^2$	28,4 / 2,94 / 0,958	19,7 / 2,61 / 0,944
Внутридиффузионная	$k(id), \text{мг}/(\text{г} \cdot \text{мин}^{0,5}) / R^2$	6,42 / 0,913	5,18 / 0,905

Испытания на реальных сточных водах

Результаты обработки производственных стоков композитом КСК-2 при дозе 2 г/л приведены в таблице 5. Для сравнения указаны показатели, полученные при отдельном применении исходного бентонита и биоугля в эквивалентной суммарной дозе.

Таблица 5.

Показатели очистки реальных сточных вод (доза 2 г/л, контакт 60 мин., отстаивание 30 мин.)

Показатель	До очистки	После КСК-2	Эффект, %	Бентонит, %	Биоуголь, %
Текстильные сточные воды					
Цветность, град.	1250	75	94,0	48,2	76,5
ХПК, мг O ₂ /л	980	176	82,0	31,4	60,8
Взвешенные вещества, мг/л	215	16	92,6	70,3	44,1
рН	8,9	7,4	—	—	—
Нефтегазовые сточные воды					
Нефтепродукты, мг/л	48,6	2,3	95,3	52,7	68,4
Взвешенные вещества, мг/л	320	18	94,4	74,8	40,2
ХПК, мг O ₂ /л	620	131	78,9	29,6	55,3
Мутность, ЕМФ	186	9	95,2	71,5	38,7

Композит превосходит каждый из исходных компонентов по всем контролируемым показателям, причём превышение не сводится к простому суммированию их вкладов. Так, эффект удаления нефтепродуктов композитом (95,3 %) существенно выше, чем у бентонита (52,7 %) и биоугля (68,4 %), взятых по отдельности. Это указывает на синергетический характер действия материала: коагулированные флоккулы нефтяной эмульсии осаждаются на развитой углеродной поверхности, а сорбированные на ней растворённые компоненты выводятся из системы вместе с осадком.

Заключение

Получен многофункциональный сорбент-коагулянт на основе шафирканского бентонита и биоугля стеблей хлопчатника, модифицированных соединениями Fe(III) и Al. Определены оптимальные условия синтеза: соотношение *бентонит: биоуголь* 2:1, концентрация активаторов 10 %, термообработка при 350 °С в течение 1,5 ч.

Формирование модифицированной структуры подтверждено увеличением межслоевого расстояния монтмориллонита и ростом удельной поверхности до 341 м²/г. Материалом проявлена высокая сорбционная активность в диапазоне рН 6–8. Максимальная сорбционная ёмкость составила 128,2 мг/г по метиленовому синему и 96,5 мг/г по нефтепродуктам.

Испытания на реальных сточных водах показали эффективное удаление цветности (94,0 %), ХПК (82,0 %), нефтепродуктов (95,3 %) и взвешенных веществ (94,4 %). Композит сочетает адсорбционные, ионообменные и коагуляционные свойства, сохраняет более 85 % активности после пяти циклов регенерации и, следовательно, наблюдается его перспектива относительно применения в локальных системах очистки промышленных сточных вод.

Список литературы

1. Раззақов Х. Қ., Амонов М.Р., Назаров С.И. Получение сорбентов на основе механической активации сапропелевого сырья // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* – 2026. – № 6 (147).
2. Ahmaruzzaman M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2011. – T. 166, № 1–2. – P. 36–59. – DOI: 10.1016/j.cis.2011.04.005.
3. Bergaya F., Lagaly G. *Handbook of Clay Science.* – 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2013. – 1752 P.
4. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2008. – T. 140, № 2. – P. 114–131. – DOI: 10.1016/j.cis.2007.12.008.
5. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // *Journal of the American Chemical Society.* – 1938. – T. 60, № 2. – P. 309–319. – DOI: 10.1021/ja01269a023.
6. Duan J., Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2003. – T. 100. – P. 475–502. – DOI: 10.1016/S0001-8686(02).
7. Freundlich H. Über die Adsorption in Lösungen // *Zeitschrift für Physikalische Chemie.* – 1907.
8. Ho Y.S. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // *Process Biochemistry.* – 1999. – T. 34, № 5. – P. 451–465. – DOI: 10.1016/S0032-9592(98).
9. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // *Journal of the American Chemical Society.* – 1918. – T. 40, № 9. – P. 1361–1403. – DOI: 10.1021/ja02242a004.
10. Lehmann J., Joseph S. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation.* – 2nd ed. – London: Routledge, 2015. – 976 P.
11. Matilainen A., Vepsäläinen M., Sillanpää M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2010. – T. 159, № 2. – P. 189–197. – DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
12. Qasem N.A. A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // *Clean Water.* – 2021. – T. 4, № 36. – DOI: 10.1038/s41545-021-00127-0.
13. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions // *Chemosphere.* – 2015. – T. 125. – P. 70–85. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.12.058.

14. Weber W.J., Morris J.C. Kinetics of adsorption on carbon from solution // Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE. – 1963. – Т. 89, № 2. – P. 31–60.
15. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2014. – Т. 209. – P. 172–184. – DOI: 10.1016/j.cis.2014.04.002.

References

1. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // Journal of the American Chemical Society. – 1918. – Vol. 40, No. 9. – DOI: 10.1021/ja02242a004.
2. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // Journal of the American Chemical Society. – 1938. – Vol. 60, No. 2. – DOI: 10.1021/ja01269a023.
3. Ho Y.S. McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. – 1999. – Vol. 34, No. 5. – DOI: 10.1016/S0032-9592(98)00112-5.
4. Weber W.J., Morris J.C. Kinetics of adsorption on carbon from solution // Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE. – 1963. – Vol. 89, No. 2.
5. Freundlich H. On adsorption in solutions // Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 1907. – Vol. 57.
6. Bergaya F., Lagaly G. Handbook of Clay Science. 2nd ed. – Amsterdam: Elsevier, 2013. – 1752 P.
7. Lehmann J., Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd ed. – London: Routledge, 2015. – 976 P.
8. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions // Chemosphere. – 2015. – Vol. 125. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.12.058.
9. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2014. – Vol. 209. – DOI: 10.1016/j.cis.2014.04.002.
10. Ahmaruzzaman M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals // Advances in Colloid and Interface Science. – 2011. – Vol. 166, No. 1. – DOI: 10.1016/j.cis.2011.04.005.
11. Duan J., Gregory J. Coagulation by hydrolysing metal salts // Advances in Colloid and Interface Science. – 2003. – Vol. 100. – DOI: 10.1016/S0001-8686(02)00067-2.
12. Matilainen A., Vepsäläinen M., Sillanpää M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2010. – Vol. 159, No. 2. – DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.
13. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review // Advances in Colloid and Interface Science. – 2008. – Vol. 140, No. 2. – DOI: 10.1016/j.cis.2007.12.008.

-
14. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // npj Clean Water. – 2021. – Vol. 4, No. 36. – DOI: 10.1038/s41545-021-00127-0.
 15. Razzaqov H.Q., Amonov M.R., Nazarov S.I. Preparation of sorbents based on the mechanical activation of sapropel raw materials // Universum: Technical Sciences (Electronic Scientific Journal). – 2026. – No. 6 (147) – URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/22965> (accessed: 19.09.2026).