



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 13–20

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 13–20

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-13-20>, EDN: BBFKWG

Научная статья

УДК 544.722



Термическая трансформация бурового шлама: структурные и поверхностные изменения

Н. С. Ержанова¹✉, Р. Н. Кубашева¹, Р. И. Кузьмина¹, З. Х. Кунашева²

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

²Западно-Казахстанский университет имени М. Утемисова, Казахстан, 090000, г. Уральск, ул. Н. Назарбаева, д. 161

Ержанова Нургюль Сандибаевна, аспирант кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, nurgul.yerzhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8687-9690>

Кубашева Раушан Нуртаевна, аспирант кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, r_kubasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Кузьмина Раиса Ивановна, доктор химических наук, профессор кафедры нефтехимии и техногенной безопасности Института химии, kuzminaraisa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Кунашева Зарипа Хайроллиевна, кандидат химических наук, ассоциированный профессор, kunasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>

Аннотация. Исследованы структурные и поверхностные изменения, происходящие в карбонатном буровом шламе на нефтяной основе при высокотемпературном пиролизе. Основное внимание уделено изучению трансформации органо-минеральной системы методом ИК-спектроскопии, а также изменению текстурных характеристик с применением адсорбционно-порового анализа. Установлено, что пиролиз обеспечивает полное удаление органической составляющей шлама, что подтверждается исчезновением характерных полос алифатических углеводородов в ИК-спектрах. При этом сохраняются и трансформируются более термостабильные ароматические и минеральные компоненты, включая карбонаты, сульфаты и силикаты. Процессы дегидратации и дегидроксилирования сопровождаются формированием активных кислотных центров, усиливающих реакционную способность материала. Адсорбционно-поровый анализ показал развитие устойчивой мезо- и макропористой структуры твердого остатка. Для образца, пиролизованного при 800°C, удельная поверхность достигает 7,3 м²/г, при среднем радиусе пор около 36Å. Гранулометрический анализ подтвердил, что остаток характеризуется мелкодисперсной и однородной структурой, с преобладанием частиц в диапазоне 0,6–2,9 нм. Такая текстура в сочетании с высокой поверхностной активностью делает материал перспективным для практического применения.

Таким образом, пиролиз бурового шлама представляет собой не только метод экологически безопасной утилизации, но и способ получения вторичного ресурса с ценными сорбционными и каталитическими свойствами. Полученные результаты могут служить основой для разработки технологий переработки буровых отходов и создания на их основе функциональных материалов.

Ключевые слова: буровой шлам, пиролиз, ИК-спектроскопия, адсорбционно-поровый анализ, удельная поверхность, пористая структура, термическая деструкция, вторичная переработка

Для цитирования: Ержанова Н. С., Кубашева Р. Н., Кузьмина Р. И., Кунашева З. Х. Термическая трансформация бурового шлама: структурные и поверхностные изменения // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 13–20. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-13-20>, EDN: BBFKWG

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Thermal transformation of drilling sludge: Structural and surface changes

N. S. Yerzhanova¹✉, R. N. Kubasheva¹, R. I. Kuzmina¹, Z. Kh. Kunasheva²

¹Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

²West Kazakhstan University named after M. Utemissov, 161 N. Nazarbayev St., Uralsk 090000, Kazakhstan

Nurgul' S. Yerzhanova, nurgul.yerzhanova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8687-9690>

Raushan N. Kubasheva, r_kubasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2999-0998>

Raisa I. Kuzmina, kuzminaraisa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6850-4510>

Zaripa Kh. Kunasheva, kunasheva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1614-5939>



Abstract. The study investigates the structural and surface changes occurring in carbonate drilling sludge (CDS) of oil-based origin under high-temperature pyrolysis. The main focus is placed on the transformation of the organo-mineral system using IR spectroscopy, as well as on the changes in textural characteristics analyzed by adsorption-pore methods (BET and BJH). It has been established that pyrolysis ensures the complete removal of the organic fraction of the sludge, which is confirmed by the disappearance of characteristic aliphatic hydrocarbon bands in the IR-spectra. At the same time, more thermally stable aromatic and mineral components, including carbonates, sulfates, and silicates, are preserved and undergo transformation. The processes of dehydration and dehydroxylation are accompanied by the formation of active acidic sites that enhance the reactivity of the material. Adsorption-pore analysis has revealed the development of a stable meso- and macroporous structure in the solid residue. For the sample pyrolyzed at 800°C, the specific surface area reached 7.3 m²/g, with an average pore radius of about 36Å. Granulometric analysis has confirmed that the residue is characterized by a fine-dispersed and homogeneous structure, with a predominance of particles in the 0.6–2.9 µm range. Such a texture, combined with high surface activity, makes the material promising for practical applications. Thus, pyrolysis of drilling sludge is not only an environmentally safe disposal method but also a way to obtain a secondary resource with valuable sorption and catalytic properties. The results obtained may serve as a basis for the development of technologies for drilling waste recycling and the creation of functional materials derived from them.

Keywords: drilling sludge, pyrolysis, IR-spectroscopy, adsorption-pore analysis, specific surface area, porous structure, thermal degradation, recycling

For citation: Yerzhanova N. S., Kubasheva R. N., Kuzmina R. I., Kunasheva Z. Kh. Thermal transformation of drilling sludge: Structural and surface changes. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 13–20 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-13-20>, EDN: BBFKWG

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Рост мирового спроса на жидкие углеводородные ресурсы неизбежно приводит к увеличению объемов бурового шлама, представляющего собой сложный техногенный отход нефтегазовой отрасли. Буровой шлам на нефтяной основе, состоящий из минеральных компонентов, остатков буровых растворов и органических примесей, является источником серьезного экологического загрязнения, а его утилизация – сложная и дорогостоящая задача [1]. Тем не менее, этот отход также обладает потенциалом в качестве альтернативного ресурса. Одним из перспективных подходов к его переработке является пиролиз – термическое разложение при высоких температурах в отсутствие кислорода. Этот метод позволяет не только обезвредить шлам, но и преобразовать его органическую часть в ценные продукты: синтетическое топливо и твердый углеродсодержащий остаток [2].

Исследования процессов пиролиза бурового шлама ведутся уже давно. Так, работы [3–6] показали, что пиролиз эффективно разлагает органические компоненты шлама, а состав и выход продуктов сильно зависят от температуры и скорости нагрева. Было установлено, что в вакуумных условиях можно повысить выход и качество жидких продуктов за счет ускоренного удаления летучих веществ и предотвращения их вторичного разложения. Однако многие аспекты изменения физико-химических свойств минеральной части шлама, в частности, формирование его пористой структуры и образование новых функциональных групп, изучены недостаточно.

Таким образом, целью настоящей работы является комплексное исследование физико-химических процессов, протекающих на поверхности карбонатного бурового шлама (КБШ) на нефтяной основе до и после его пиролиза. Для этого будет применен комплекс современных аналитических методов, включая ИК-спектроскопию для анализа изменений в составе органических и минеральных фаз, а также адсорбционно-поровый анализ (ВЕТ и ВJH) для оценки структурных трансформаций и развития пористости материала. Полученные результаты позволят не только глубже понять механизмы термической деструкции бурового шлама, но и обосновать его потенциальное использование в качестве перспективного сорбента или каталитического носителя.

Материалы и методы

Для изучения физико-химических процессов, протекающих на поверхности карбонатного бурового шлама на нефтяной основе до и после пиролиза, применялся комплекс методов спектроскопического и сорбционного анализа.

ИК-спектроскопия

Анализ функциональных групп органической и минеральной составляющих шлама проводился с использованием инфракрасного спектрометра ИКС-29, который зарекомендовал себя как надёжный прибор для качественного и количественного исследования органо-минеральных систем. Перед началом работы спектрофотометр включался в соответствии с инструкцией производителя и проходил прогрев в течение 45 мин.



Образцы предварительно измельчались до порошкообразного состояния; для регистрации спектров готовились прессованные таблетки с бромидом калия либо суспензии в парафиновом масле. Подготовленные образцы помещались в кюветное отделение прибора, после чего регистрировались спектры поглощения в диапазоне средних ИК-частот. Полученные данные использовались для идентификации изменений в составе органических и минеральных фаз, происходящих в процессе пиролиза [7, 8].

Адсорбционно-поровый анализ

Изучение удельной поверхности и распределения пор по размерам в твёрдом остатке после пиролиза проводилось методом низкотемпературной адсорбции азота при 77 К на автоматическом анализаторе поверхности «Quantachrome NOVA 1200e», сопряжённом с персональным компьютером и специализированным программным обеспечением. Перед измерениями образцы подвергались дегазации под вакуумом при температуре 200°C в течение 2 ч для удаления влаги и адсорбированных газов.

Расчёт удельной поверхности осуществлялся по методу Брунауэра – Эммета – Теллера (ВЕТ). По уравнению ВЕТ определялся объём монослоя адсорбата, число молекул в монослое и суммарная площадь поверхности, принимая во внимание стандартную площадь, занимаемую одной молекулой. Метод применялся в области относительных давлений 0,05–0,35 (P/P_0), где его погрешность составляет 5–10%.

Для определения распределения пор по размерам использовался метод Баррета – Джойнера – Халенды (ВЖН). В основе модели лежало допущение о цилиндрической форме пор и равенстве радиуса поры сумме радиуса Кельвина и толщины адсорбированной плёнки на стенке пор. Для расчётов использовались данные десорбционной ветви изотерм в диапазоне относительных давлений 0,967–0,4 (P/P_0) [9, 10].

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что пиролиз оказывает комплексное воздействие на органо-минеральную систему карбонатного бурового шлама на нефтяной основе. Изменения прослеживаются как на уровне функциональных групп, так и в характеристиках пористой структуры. Дальнейшее обсуждение сосредоточено на интерпретации этих изменений и их возможных механизмах.

1. ИК-спектроскопический анализ

Сравнительный анализ ИК-спектров бурового шлама до и после пиролиза позволяет выявить закономерности трансформации его органо-минеральной структуры и установить ключевые физико-химические процессы, происходящие в материале при термообработке.

В спектре исходного бурового шлама доминируют полосы, связанные с органической составляющей нефтяной основы (рис. 1).

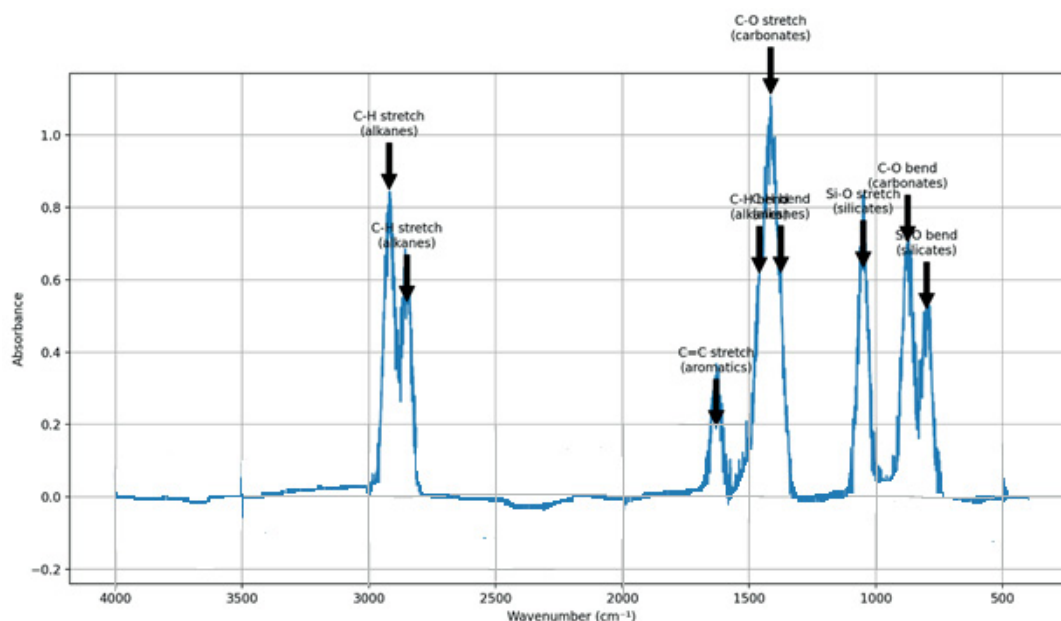


Рис. 1. ИК-спектр образца КБШ до пиролиза
Fig. 1. IR-spectrum of the carbonate drilling sludge sample before pyrolysis



Валентные колебания связей С–Н в алканах (2920 и 2850 см^{-1}) и деформационные колебания метильных и метиленовых групп (1460 и 1375 см^{-1}) свидетельствуют о высоком содержании алифатических углеводородов. Наличие полосы при 1630 см^{-1} указывает на присутствие ароматических структур, а широкая область $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$, а также полоса при $\sim 1630\text{ см}^{-1}$ связаны с присутствием физически адсорбированной и координированной воды. Характерные полосы карбонатных ионов (1415 и 875 см^{-1}), а также Si–O связей в силикатных структурах (1050 и 800 см^{-1}) подтверждают минеральную природу неорганической матрицы шлама.

В ИК-спектре твердого остатка после пиролиза интенсивность полос, связанных с алифатическими углеводородами (2920 и 2850 см^{-1}), резко снижается, что указывает на их термическое разрушение и выделение летучих продуктов пиролиза (рис. 2). Полоса при 1630 см^{-1} , связанная с ароматическими структурами, сохраняется, что отражает их более высокую термическую устойчивость и склонность к карбонизации. Существенные изменения наблюдаются в области $3200\text{--}3600$ и 1630 см^{-1} , где исчезают или значительно ослабевают сигналы, связанные с O–H и H–O–H колебаниями, что обусловлено дегидратацией и дегидроксилированием.

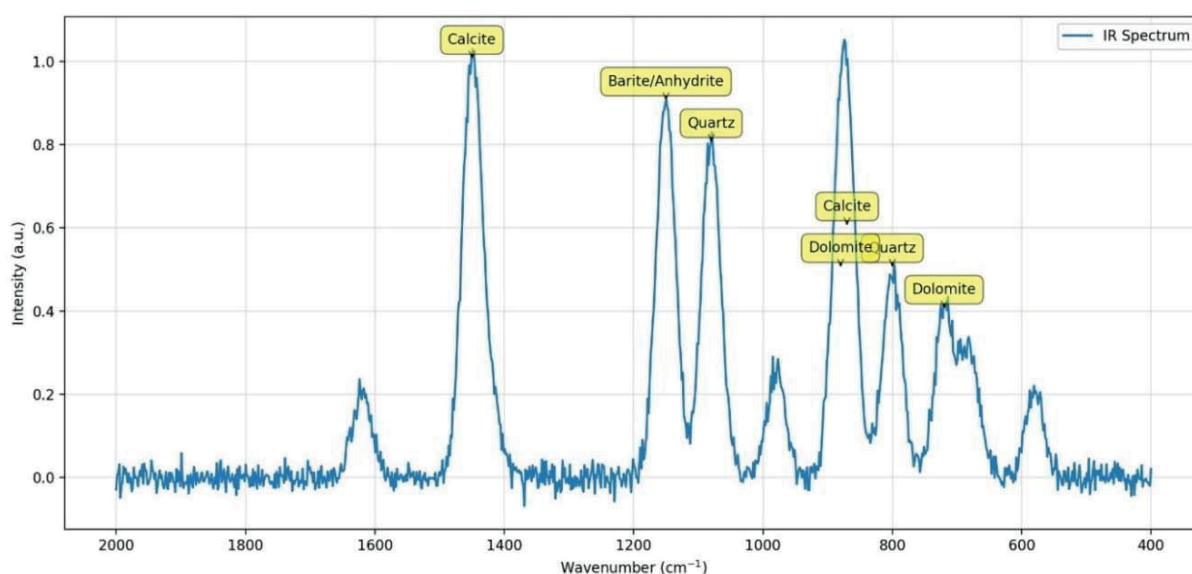


Рис. 2. ИК-спектр КБШ после пиролиза
Fig. 2. IR-spectrum of the carbonate drilling sludge after pyrolysis

Одновременно усиливаются полосы, характерные для минеральной матрицы. В области $1400\text{--}1450$ и 870 см^{-1} более отчетливо проявляются карбонатные фазы (кальцит, доломит), а в диапазоне $1000\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ фиксируются интенсивные сигналы сульфатных минералов (барит, ангидрит). Полосы кварца и силикатов (1080 , 800 и 780 см^{-1}) становятся более выраженными, что связано как с относительным увеличением минеральной составляющей после выгорания органики, так и с частичной перестройкой силикатной решетки при нагреве. В низкочастотной области ($400\text{--}600\text{ см}^{-1}$) появляются широкие полосы, соответствующие колебаниям металл–кислород, что может указывать на формирование оксидов железа, кальция и других металлов.

Таким образом, пиролиз бурового шлама сопровождается последовательным разрушением органической составляющей, дегидратацией и дегидроксилированием, а также концентрацией и частичной трансформацией минеральных фаз. Эти процессы приводят к образованию значительного количества кислотных активных центров (карбонатных, сульфатных, силикатных и оксидных), которые способны определять реакционную и сорбционную способность твердого остатка. Полученные результаты позволяют заключить, что пиролиз не только способствует утилизации органической части шлама, но и формирует перспективный по своим физико-химическим свойствам продукт для дальнейшего промышленного применения.



Однако данные ИК-спектроскопии отражают лишь качественный состав поверхности. Для более полного понимания необходимо учитывать текстурные характеристики материала.

2. Текстурные характеристики

Методы низкотемпературной адсорбции азота (ВЕТ, ВЈН) подтвердили данные спектроскопии, показав развитие мезо- и макропористой структуры твердого остатка. Для образца, пиролизованного при 800°C, удельная поверхность составляет 7,3 м²/г (ВЕТ) и 3,8 м²/г (ВЈН), объем пор – 0,017 см³/г, при среднем радиусе 36 Å (рис. 3).

Распределение пор свидетельствует о преобладании мезо- и макропор: около 45% приходится на поры радиусом более 100 Å. При этом повышение температуры сопровождается уменьшением доли макропор и перераспределением порового пространства в пользу пор диаметром 10–20 и 40–80 Å. Эти изменения связаны с уплотнением углеродной матрицы и осаждением углеродсодержащих остатков на стенках пор, что подтверждает данные ИК-анализа о накоплении коксообразующих фракций.

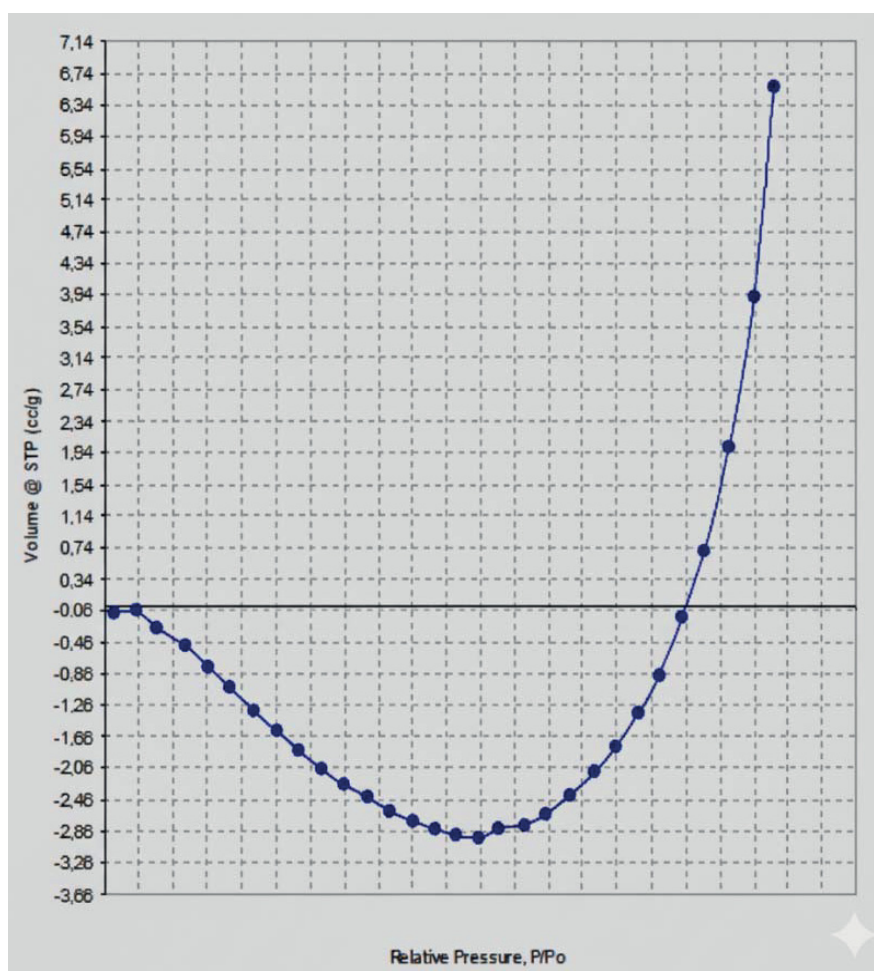


Рис. 3. Зависимость объема пор поверхности КБШ после пиролиза от относительного давления

Fig. 3. Dependence of pore volume of the carbonate drilling sludge after pyrolysis on relative pressure

3. Гранулометрический состав

Гранулометрический анализ показал, что твердый остаток пиролиза КБШ при 800°C характеризуется мелкодисперсной структурой. Основная масса частиц сосредоточена

в диапазоне 0,6–2,9 нм, при этом наиболее выражены фракции 0,554–0,840 нм (21,3%) и 1,035–1,933 нм (21,8%) (рис. 4).

Более крупные частицы (3,6–4,4 нм) составляют лишь 12,3% от общей массы (таблица).

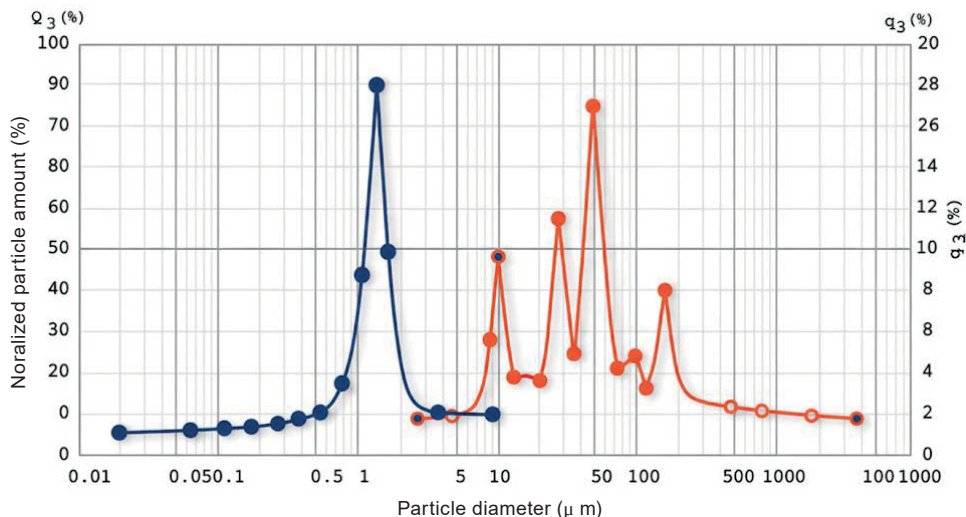


Рис. 4. Количественное распределение частиц по размерам
Fig. 4. Quantitative particle size distribution

Гранулометрический состав КБШ полученного после пиролиза

Table. Particle size distribution of the carbonate drilling sludge obtained after pyrolysis

Размер частиц, нм / Particle size, µm	Содержание частиц, % от общего количества / Particle content, % of the total amount
0,556–0,841	21,3
1,037–1,929	21,8
2,371	15,6
2,946	16,8
3,616–4,440	12,3

Высокая степень дисперсности и однородность частиц создают предпосылки для увеличения удельной поверхности и улучшения сорбционных свойств твердого остатка.

4. Функциональная значимость полученных результатов

Совокупность данных ИК-спектроскопии, адсорбционных измерений и гранулометрии показывает, что пиролиз бурового шлама сопровождается комплексной трансформацией структуры материала:

- 1) разложением органической фазы и формированием углеродсодержащего покрытия;
- 2) дегидратацией и дегидроксилированием, сопровождающимся исчезновением полос воды и ОН-групп;
- 3) перераспределением порового пространства с формированием устойчивой мезопористой структуры;
- 4) измельчением частиц и повышением их однородности.

Эти изменения придают твердому остатку новые функциональные свойства: наличие кислотных центров, развитая поверхность и устойчивая текстура. Такой материал может рассматриваться как перспективный сорбент, носитель катализатора или минеральная добавка для строительных композиционных материалов.

Заключение

Проведенное исследование позволило комплексно изучить физико-химические и структурные изменения, происходящие с карбонатным буровым шламом на нефтяной основе под воздействием высокотемпературного пиролиза. Результаты, полученные с помощью ИК-спектроскопии, адсорбционно-порового анализа и гранулометрии, подтвердили, что пиролиз является эффективным методом для утилизации этого вида промышленных отходов.



Основные выводы исследования

1. ИК-спектры убедительно показали, что пиролиз полностью разрушает органические соединения, содержащиеся в шламе, что приводит к образованию твердого углеродсодержащего остатка. Это не только решает проблему экологической опасности, но и позволяет получить потенциально ценный продукт.

2. Адсорбционно-поровой анализ продемонстрировал, что пиролиз способствует формированию развитой мезо- и макропористой структуры. Наличие разветвленной системы пор и высокой удельной поверхности делает твердый остаток перспективным материалом для применения в качестве сорбента, например, для очистки сточных вод или газов, а также как носителя катализаторов.

3. В процессе термической обработки происходит концентрация минеральных фаз и образование новых активных центров (карбонатных, сульфатных, оксидных), что усиливает сорбционные и реакционные свойства материала.

4. Гранулометрический анализ подтвердил, что твердый остаток пиролиза представляет собой мелкодисперсный, гомогенный порошок. Этот фактор значительно расширяет возможности его использования, например, в качестве минеральной добавки в строительные смеси или цемент.

Таким образом, пиролиз бурового шлама является не просто методом его обезвреживания, но и технологией, позволяющей получать ценный вторичный ресурс с уникальными физико-химическими свойствами. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию условий пиролиза для получения материала с заданными характеристиками, а также на изучение его эффективности в конкретных промышленных применениях.

Список литературы

1. Моисеенко А. С., Командровский В. Г., Ступак И. С. Специализированная информационно-измерительная система оперативного инфракрасного анализа минерального состава шлама бурящейся скважины // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 2. С. 7–9.
2. Moghaddas M. A., Yi A. Y., Graff K. F. Temperature measurement in the ultrasonic-assisted drilling process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. № 103. P. 187–199. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03487-7>
3. Akyürek Z. Sustainable valorization of animal manure and recycled polyester: Co-pyrolysis synergy // Sustainability. 2019. № 11. P. 22–80. <https://doi.org/10.3390/su11082280>
4. Oliveira Neto G. C., Chaves L. E. C., Pinto L. F. R., Antana J. C. C., Amorim M. P. C., Rodrigues M. J. F. Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil // Sustainability. 2019. № 11. P. 20–76. <https://doi.org/10.3390/su1102076>
5. Xinxin Tang, Xuesong Wei, Songying Chen. Continuous pyrolysis technology for oily sludge treatment in the chain-slap conveyors // Sustainability. 2019. № 11. P. 1–10. <https://doi.org/10.3390/su11133614>
6. Chen Z., Wei L. Research of oily sludge treatment technology and technological application // The Science Publishing Company: Beijing, China. 2012. № 8. P. 87–109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012173>
7. Рудакова Л. В., Пичугин Е. А., Зильберман М. В., Зырянова Е. В. Влияние кислотного стабилизатора грунтов на кислотно-основные свойства буровых шламов // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 10. С. 29–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-29-33>
8. Сивакова Л. Г., Касьянова О. В. Модификация твердого остатка пиролиза растворами ПАВ // Химия и химическая технология: достижения и перспективы : сб. материалов IV Всерос. конф. (Кемерово, 27–28 ноября 2018 г.). Кемерово : КузГТУ, 2018. С. 1–5.
9. Касьянова О. В., Шапранко Д. С., Дудникова Ю. Н., Исмаилов З. Р. Исследование физико-химических характеристик твердого остатка пиролиза резино-технических изделий // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 2. С. 101–110. <https://doi.org/10.267/30/1999-4125-2019-2-101-110>
10. Moghaddas M. A., Short M. A., Wiley N. A., Yi A. Y., Graff K. F. Performance of an ultrasonic-assisted drilling module // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019. № 94. P. 3019–3028. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0495-7>

References

1. Moiseenko A. S., Komandrovskiy V. G., Stupak I. S. Specialized information-measuring system for operational infrared analysis of the mineral composition of drilling well sludge. *Automation, Telemechanization and Communication in the Oil Industry*, 2014, no. 2, pp. 7–9 (in Russian).
2. Moghaddas M. A., Yi A. Y., Graff K. F. Temperature measurement in the ultrasonic-assisted drilling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, no. 103, pp. 187–199. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03487-7>
3. Akyürek Z. Sustainable valorization of animal manure and recycled polyester: Co-pyrolysis synergy. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 22–80. <https://doi.org/10.3390/su11082280>



4. Oliveira Neto G. C., Chaves L. E. C., Pinto L. F. R., Antana J. C. C., Amorim M. P. C., Rodrigues M. J. F. Economic, environmental and social benefits of adoption of pyrolysis process of tires: A feasible and ecofriendly mode to reduce the impacts of scrap tires in Brazil. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 20–76. <https://doi.org/10.3390/su1102076>
5. Xinxin Tang, Xuesong Wei, Songying Chen. Continuous pyrolysis technology for oily sludge treatment in the chain-slap conveyors. *Sustainability*, 2019, no. 11, pp. 1–10. <https://doi.org/10.3390/su11133614>
6. Chen Z., Wei L. Research of oily sludge treatment technology and technological application. *The Science Publishing Company: Beijing, China*, 2012, no. 8, pp. 87–109. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012173>
7. Rudakova L. V., Pichugin E. A., Zilberman M. V., Zyryanova E. V. Influence of soil acid stabilizer on the acid–base properties of drilling sludge. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 10, pp. 29–33 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-10-29-33>
8. Sivakova L. G., Kasyanova O. V. Modification of the solid residue of pyrolysis with surfactant solutions. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy: sb. materialov IV Vseros. konf. (Kemerovo, 27–28 noyabrya 2018 g.)* [Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects: Coll. of materials IV All-Russian conf. (Kemerovo, November 27–28, 2018)]. Kemerovo, Kuzbass State Technical University Publ., 2018, pp. 1–5 (in Russian).
9. Kasyanova O. V., Shapranko D. S., Dudnikova Yu. N., Ismagilov Z. R. Research of the physical and chemical characteristics solid residue pyrolysis of resinotechnical products. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2019, no. 2, pp. 101–110 (in Russian). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2019-2-101-110>
10. Moghaddas M. A., Short M. A., Wiley N. A., Yi A. Y., Graff K. F. Performance of an ultrasonic-assisted drilling module. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, no. 94, pp. 3019–3028. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0495-7>

Поступила в редакцию 13.10.2025, одобрена после рецензирования 20.10.2025, принята к публикации 10.11.2025
The article was submitted 13.10.2025, approved after reviewing 20.10.2025, accepted for publication 10.11.2025