

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 66.092-977

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-59-68



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА БУРОВОГО ШЛАМА

Валеева А.Р.^{1,2}, Хазиахмедова Р.М.¹, Валиуллина А.И.¹, Забелкин С.А.^{1,2},
Грачев А.Н.^{1,2}, Киселев Д.Ю.^{1,2}

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

²ООО «ТУ БИО», Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Рост объемов бурового шлама, образующегося при добыче нефти и газа, требует разработки эффективных методов его утилизации. Традиционные способы, такие как захоронение и инъекция в глубинные горизонты, сопряжены с экологическими рисками. Одним из перспективных методов переработки является пиролиз, обеспечивающий снижение токсичности отходов и извлечение ценных продуктов. **Цель работы.** Изучение процесса пиролиза бурового шлама и характеристика полученных продуктов. **Используемые методы.** В ходе экспериментов проведен анализ исходного сырья, выполнены термический анализ, пиролиз в лабораторной установке с неподвижным слоем при температуре 550°C, а также исследование состава и свойств продуктов пиролиза. Получены данные о материальном балансе, выходе жидкой и твердой фракций, а также газообразных продуктов. **Новизна работы.** Заключается в детальном исследовании химического состава пиролизной жидкости методом ГХМС, а также в оценке свойств твердого остатка. **Результаты.** Установлено, что органическая часть пиролизной жидкости на 62% состоит из алканов, что делает её пригодной для использования в качестве топлива. Твердый остаток, содержащий преимущественно минеральную часть шлама, может применяться в строительстве или в качестве сорбента. **Практическая значимость.** Данные, полученные в ходе исследования, подтверждают, что пиролиз является эффективным методом переработки бурового шлама с возможностью извлечения полезных продуктов, что способствует снижению экологического ущерба и оптимизации процессов нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: буровой шлам, пиролиз, утилизация отходов, термическая деструкция, вторичные продукты

© Валеева А.Р., Хазиахмедова Р.М., Валиуллина А.И., Забелкин С.А., Грачев А.Н., Киселев Д.Ю., 2025

Для цитирования

Исследование продуктов пиролиза бурового шлама / Валеева А.Р., Хазиахмедова Р.М., Валиуллина А.И., Забелкин С.А., Грачев А.Н., Киселев Д.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 59-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-59-68>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF PYROLYSIS PRODUCTS OF BORING SLUDGE

Valeeva A.R.^{1,2}, Khaziakhmedova R.M.¹, Valiullina A.I.¹, Zabelkin S.A.^{1,2},
Grachev A.N.^{1,2}, Kiselev D.Y.^{1,2}

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²TO BIO LLC, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The growing volume of boring sludge generated during oil and gas production requires the development of effective methods for its disposal. Traditional methods such as burial and injection into deep horizons are associated with environmental risks. One of the promising methods of waste recycling is pyrolysis, which reduces the toxicity of waste and allows to obtain valuable products. **Objectives** are to study the pyrolysis process of boring sludge and the characteristics of the resulting products. **Methods Applied.** During the experiments, the analysis of raw materials, thermal analysis, pyrolysis in a laboratory unit with a fixed layer at a temperature of 550°C, as well as the study of the composition and properties of pyrolysis products were carried out. Data on the material balance, the output of liquid and solid fractions, as well as gaseous products were obtained. **Originality.** It consists in a detailed study of the chemical composition of the pyrolysis liquid by gas chromatography, as well as in evaluating the properties of the solid residue. **Result.** It was found that the organic part of the pyrolysis liquid consists of 62% alkanes, which makes it suitable for use as a fuel. The solid residue, containing mainly the mineral part of the sludge, can be used in construction or as a sorbent. **Practical Relevance.** The data obtained during the study confirm that pyrolysis is an effective method of processing boring sludge with the possibility of extracting useful products, which helps reduce environmental damage and optimize the processes of the oil and gas industry.

Keywords: boring sludge, pyrolysis, waste utilization, thermal degradation, secondary products.

For citation

Valeeva A.R., Khaziakhmedova R.M., Valiullina A.I., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Kiselev D.Y. Study of Pyrolysis Products of Boring Sludge. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 59-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-59-68>

Введение

На сегодняшний день нефтяная промышленность является неотъемлемой частью современной цивилизации. Однако при добыче нефти кроме ценных ресурсов выделяются большие объемы побочных продуктов, а именно буровых шламов. Согласно определению отраслевого стандарта (ОСТ 51.01-06-85), буровой шлам – это измельченная выбуренная порода, загрязненная остатками бурового раствора (ОБР). Данный вид отходов образуется в процессе бурения нефтяных и газовых скважин. Объемы этих отходов постоянно растут вместе с увеличением активности в нефтегазовой промышленности, что требует разработки эффективных методов их утилизации. Буровые шламы, как побочный продукт добычи нефти и газа, представляют проблему для экологии и человека. Потенциальное загрязняющее действие на окружающую среду в основном обусловлено содержанием токсичных компонентов. Большую часть бурового шлама составляют малоопасные компоненты, как правило, имеющие IV класс опасности, пластовые флюиды и выбуренная порода. Токсичность бурового шлама может сильно варьироваться от месторождения нефти. Различные месторождения содержат различный химический состав, что влияет на состав и характеристики бурового шлама. Опасность бурового шлама обусловлена наличием в его составе тяжелых металлов и опасных химических соединений, таких

как бензол, толуол, которые могут оказывать негативное влияние на здоровье человека [1, 2].

Традиционные методы утилизации буровых шламов, такие как складирование или инъекция в глубинные скважины, часто не обеспечивают полной очистки и могут привести к нежелательным экологическим последствиям, включая загрязнение почвы, воды и атмосферного воздуха. Поэтому важной задачей современной индустрии является поиск более эффективных методов утилизации и переработки данного вида отхода.

Для более глубокого понимания проблемы утилизации буровых шламов и поиска оптимальных решений были рассмотрены другие существующие подходы и методы. На сегодняшний день существует множество различных способов утилизации шлама, краткий обзор которых представлен в табл. 1.

Можно предполагать, что сжигание и пиролиз обеспечивают более высокую степень обезвреживания, но требуют значительных затрат. Биологические методы могут быть менее затратными, но их эффективность ограничена условиями окружающей среды. Переработка через смешивание с торфом или солидификацию может найти полезное применение в качестве производства строительных материалов, но требует контроля за выбросами вредных веществ. Захоронение является наиболее популярным и доступным методом, однако негативное воздействие на окружающую среду максимальное.

Таблица 1. Методы утилизации буровых шламов
Table 1. Boring sludge utilization methods

Методы утилизации	Разновидность метода
Термические	Сжигание в печах различной конструкции [3]
	Сушка, прогрев в печах различной конструкции [4]
	Высокотемпературный обжиг в печах различной конструкции [5]
Физические	Захоронение в специально отведённых местах, в глубоководные горизонты, в земляные амбары, шламохранилища и т.д. [6]
	Закачка в глубоководные горизонты, в образованные гидроразрывом пласта трещины [7]
Химические и физико-химические	Отверждение с применением неорганических (цемент, жидкое стекло, окись алюминия и др.) и органических (фенолформальдегидные смолы и др.) добавок с получением отверждённой смеси [8]
	Гидрофобизация поверхности шлама с помощью органических или растворимых высокомолекулярных соединений (сополимер малеиновый ангидрид с акриламидом, сополимер малеиновый ангидрид со стиролом) с последующим действием электролитов [9]
	Перемешивание бурового шлама с реагентом капсулирования [10]
	Смешение бурового шлама с торфом, песком, навозом, гипсом, портландцементом, известью, карбамидными и формальдегидными смолами и др. [11–13]
	Биодеструкция загрязняющих компонентов буровых отходов с помощью микроорганизмов (биоремедиация) [14]
Биологические	Рекультивация нарушенных земель [15]
	Смешение бурового шлама с гуминоминеральными концентратами [16]
	Безамбарное бурение [17, 18]
Комплексные	Переработка буровых шламов с максимальным учётом химических, физико-механических свойств и использованием всех составляющих, в результате которой отходы становятся сырьём, реагентами или наполнителями в процессе производства продукции и не оказывают отрицательного воздействия на окружающую природную среду [14]

Пиролизная переработка шламов привлекает пристальное внимание из-за наиболее полного удаления нежелательных компонентов, значительного уменьшения объёмов и возможности извлечения ресурсов. Метод пиролиза основан на нагреве органического материала, в данном случае бурового шлама, в отсутствие кислорода. Под воздействием высокой температуры органические вещества переходят в парогазовое состояние или разлагаются на более простые соединения с последующим переходом в парогаз [19, 20]. Далее часть парогазовой смеси конденсируется с получением жидкого продукта. Этот процесс проис-

ходит в специальных реакторах или печах. Полученные газы и жидкости могут быть использованы как топливо или химическое сырьё, а твёрдые продукты могут использоваться в различных областях либо могут быть утилизированы с меньшими затратами и меньшим негативным воздействием [21–23].

Цюаньвэй в своем исследовании [24] отметил, что выход газа увеличивается с 2,55 до 6,75% при повышении температуры с 450 до 600°C. Важно отметить, что выход нефти достигает максимума (14,94%) при температуре 500°C, а затем снижается до 12,10% при 600°C. На основании полученных результатов было решено проводить пиролиз органической биомассы при температуре 500°C для оптимизации выхода нефтепродуктов.

В другом своем исследовании Цюаньвэй и др. [25] обратили внимание на влияние температуры и использование катализаторов на процесс пиролиза бурового шлама, в частности на извлечение нефти. Результаты подтвердили, что температура пиролиза играет ключевую роль в формировании конечных продуктов, и оптимальная температура составляет 500°C для достижения максимального выхода нефти. Кроме того, обнаружили, что каталитический пиролиз, особенно при использовании катализатора, такого как СаО, приводит к увеличению содержания нефтепродуктов и значительному улучшению их качества. Это проявляется в увеличении содержания алканов и снижении гетероатомных соединений в нефти. Особый интерес вызывает увеличение содержания лёгких углеводородов после каталитического пиролиза с добавлением СаО, что делает нефть более перспективным в качестве топлива.

Исследователи из Казахстана провели определение элементного состава твёрдого остатка пиролиза бурового шлама. Из полученных данных видно, что основой служат карбонаты, такие как карбонат кальция. Содержание в составе остатка твёрдых металлов не обнаружено, что подтверждает низкий класс опасности твёрдых продуктов пиролиза. Также в своем исследовании они указали возможность использования твёрдого остатка в качестве адсорбента за счёт неплохих показателей площади удельной поверхности и крупных размеров пор [26].

Студенты ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» в своей работе выяснили, что пиролиз бурового шлама при температуре 450–600°C позволит получить до 6,3% углеводородных фракций, на 95% состоящих из парафино-нафтеновых углеводородов. Твёрдые продукты пиролиза являются нетоксичными и не содержат тяжёлых металлов. Всё это в совокупности показывает перспективность процесса пиролиза как метода утилизации бурового шлама. Максимальный предел удаления углеводородов из проб бурового шлама достигается при температурах выше 450°C и далее их количество изменяется незначительно [27].

Цзебан Ся и др. исследовали совместный пиролиз ПВХ и бурового шлама. Результаты анализа продуктов пиролиза показали, что добавление отходов ПВХ увеличивает долю углеводородов в продуктах пиролиза бурового шлама, особенно при производстве алканов. Кроме того, добавление отходов ПВХ может в определенной степени снизить образование SO_2 в пиролизном газе бурового шлама [28].

Сянгле Чен и др. исследовали влияние твердых продуктов пиролиза бурового шлама на здоровье человека. Содержание золы составило 84,38%, а содержание углеводородов нефти превышало контрольные значения, что представляет потенциальную опасность для здоровья человека. Обнаружены также высокие уровни тяжелых металлов, включая свинец, хром, цинк, медь и мышьяк, превышающие фоновые значения почвы, особенно остро выделялся цинк. Однако при использовании остатков пиролиза для строительных целей был выявлен низкий уровень экологического риска, хотя для детей могут существовать неканцерогенные риски, особенно связанные с содержанием свинца [29].

Метод пиролиза привлекает всё больше внимания как потенциально перспективный способ утилизации буровых шламов. Пиролиз может позволить преобразовать отходы в полезные жидкие и твердые продукты, которые могут быть использованы в других областях. Также преимуществом данного метода является минимизация негативного воздействия на окружающую среду.

Таким образом, данная статья направлена на рассмотрение метода пиролиза как способа утилизации бурового шлама, оценку потенциала этого метода для решения актуальной проблемы в нефтегазовой промышленности.

Материалы и методы исследования

Буровой шлам представляет собой густую текучую коричневатую мелкозернистую жидкость - смесь породы и бурового раствора. Исследуемый буровой шлам был образован на Уренгойском месторождении. При хранении расслаивается и на поверхности образуется маслянистый слой раствора.

Был проведён анализ свойств бурового шлама. Влажность образцов измерялась при помощи волюмометрического титратора серии V20, марки Mettler Toledo, результатом измерений является массовая доля воды в образце, выражающаяся в процентах. Теплота сгорания определялась при помощи калориметра марки ИКА серии 5000.

Зольность шлама определялась согласно ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности». Навеска массой 1 г помещалась в заранее прокаленные при 815°C тигли, после чего помещалась в муфельную печь и равномерно в течение 60 мин нагревалась до 500°C с последующей выдержкой при этой температуре в течение 30 мин. После этого повышали температуру до 815°C и выдерживали в течение 1 ч при достижении температуры.

Определение содержания летучих веществ и нелетучего углерода проводилось согласно ГОСТ Р 55660-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ». Навеска массой 1 г помещалась в заранее прокаленные тигли с притёртыми крышками и помещалась в муфельную печь, нагретую до 900°C , и выдерживалась в течение 7 мин. После чего доставалась из печи, охлаждалась в течение 5 мин и помещалась в эксикатор.

Для оценки параметров термического разложения сырья был проведён его термический анализ. Для этого использовался термоанализатор NETZSCH STA 449 C. Для исследования образцов использовались керамические тигли. Эксперименты проводились в среде аргона, скорость нагрева составляла $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Предварительно образец выдерживался при температуре 30°C до достижения состояния равновесия. Для этого в течение 5 мин поддерживался изотермический режим. После этого температура с заданной скоростью повышалась до 900°C . Затем вновь в течение 5 мин поддерживался изотермический режим. Скорость подачи газа составляла 100 мл/мин.

Химический состав жидких продуктов пиролиза определялся методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии ГХМС на установке GCMS-QP2010 фирмы «Shimadzu» на колонке HP-1 MS.

Пиролиз проводился на лабораторной установке с неподвижным слоем. Установка состоит из реторты, муфельной печи, холодильника и приёмной колбы (рис. 1). Стенд состоит из муфельной печи 1, имеющей камеру нагрева 3, реторту 4, табло 2 и регулятор нагрева 5, сборника пиролизной жидкости 6 и гидрозатвора 7.

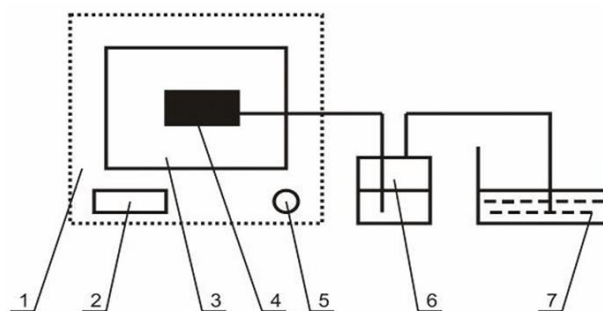


Рис. 1. Схема лабораторной установки пиролиза
Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory pyrolysis unit

Исследования термического разложения бурового шлама проходили следующим образом. Предварительно выдержанный при комнатной температуре и хорошо перемешанный образец помещался в цилиндрическую металлическую реторту. Реторта устанавливалась в муфельную печь при комнатной температуре и нагревалась до 550°C со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ до прекращения конденсации пиролизной жидкости и до практически полного выделения газа. Выходной патрубок реторты присоединялся к водяному холодильнику, на котором была установлена приёмная

колба. После холодильника устанавливалась ловушка для сбора пролетевших паров. При нагреве образцов начинается процесс термического разложения с образованием парогазовой смеси. Далее парогазовая смесь проходит через холодильник, где происходит конденсация жидких продуктов пиролиза. В результате эксперимента был сделан замер выхода жидких и твёрдых продуктов, выход газообразных продуктов рассчитывался по остатку. Для расчета выхода продуктов пиролиза бурового шлама использовались данные 7-ми циклов пиролизом при одинаковых условиях.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты анализа свойств исходного бурового шлама представлены в **табл. 2**. Как видно из данных, буровой шлам в большей степени состоит из минеральной части, о чем свидетельствует высокий процент зольности.

Таблица 2. Свойства исходного бурового шлама
Table 2. Properties of initial boring sludge

Показатель	Значение
Влажность, %	5,9
Зольность, %	65,3
Летучие вещества, %	25,7
Нелетучий углерод, %	9
Остаток при 815°C	74,1
Остаток при 900°C	74
Теплота сгорания, кДж/кг	9020

В ходе исследования были получены продукты пиролиза – пиролизная жидкость и твёрдые продукты. Пиролизная жидкость имеет два слоя: нижний слой – прозрачный светло-жёлтый, верхний слой – мутный темно-жёлтый. Со временем верхняя часть пиролизной жидкости темнеет и становится красновато-коричневого цвета в связи с процессами окисления (**рис. 2, а**).

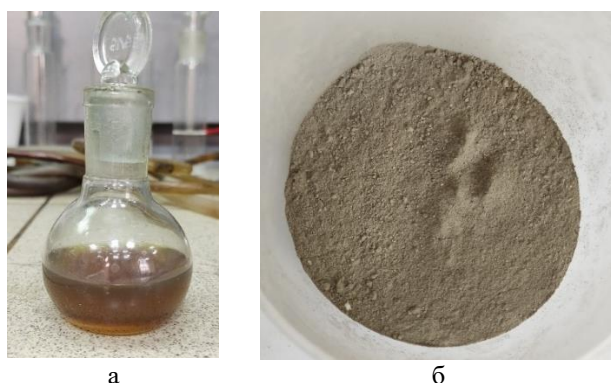


Рис. 2. Продукты пиролиза бурового шлама:
а – пиролизная жидкость;
б – твёрдые продукты

Fig. 2. Boring sludge pyrolysis products: a is pyrolysis liquid; b is solid products

Твёрдый остаток представляет собой мелкодисперсный порошок серого цвета. В процессе пиролиза сильно налипает на стенки реторты, что представляет собой сложность для качественного вычищения реактора после пиролиза.

Был составлен усредненный материальный баланс процесса пиролиза бурового шлама (**табл. 3**).

Таблица 3. Материальный баланс пиролиза бурового шлама

Table 3. Material balance of boring sludge pyrolysis process

Образец	Выход продуктов пиролиза, %		
	Твёрдые продукты	Пиролизная жидкость	Газ (по остатку)
Буровой шлам	74,13	23,44	2,42

Пиролизная жидкость образца была разделена на фракции (верхнюю и нижнюю) для определения процентного соотношения верхней и нижней фракции в пиролизной жидкости. Верхняя фракция составила 81,59% массы пиролизной жидкости, нижняя – 18,40%.

Была измерена влажность каждой фракции и теплота сгорания верхней фракции (**табл. 4**).

Таблица 4. Свойства пиролизной жидкости бурового шлама

Table 4. Properties of pyrolysis fluid of boring sludge

Образец	Влажность, %		Теплота сгорания, Дж/г
	Нижняя фракция	Верхняя фракция	Верхняя фракция
Жидкий продукт пиролиза бурового шлама	94,05	0,21	44 276

Теплота сгорания нижней фракции не замерялась из-за высокого содержания воды.

Результаты анализа химического состава органической части жидких продуктов пиролиза буровых шламов методом ГХМС представлены на **рис. 3**.

Из представленной таблицы видно, что буровой шлам содержит разнообразные углеводороды преимущественно алканового ряда (62,46%), в меньшей степени представлены углеводороды класса циклоалканов (2,17%) и алкенов (2,49%). Также отмечается незначительное содержание ароматических углеводородов (толуол, нафталин), жирные кислоты и стероиды.

Согласно данным ГХМС (**рис. 3**), наибольшее содержание имеет тридекан, 6-метил – 21,6%, октан, 2,4,6-триметил – 10,23% и гептокозан – 9,2%.

Также проведен технический анализ угля бурового шлама. Полученные результаты представлены в **табл. 5**.

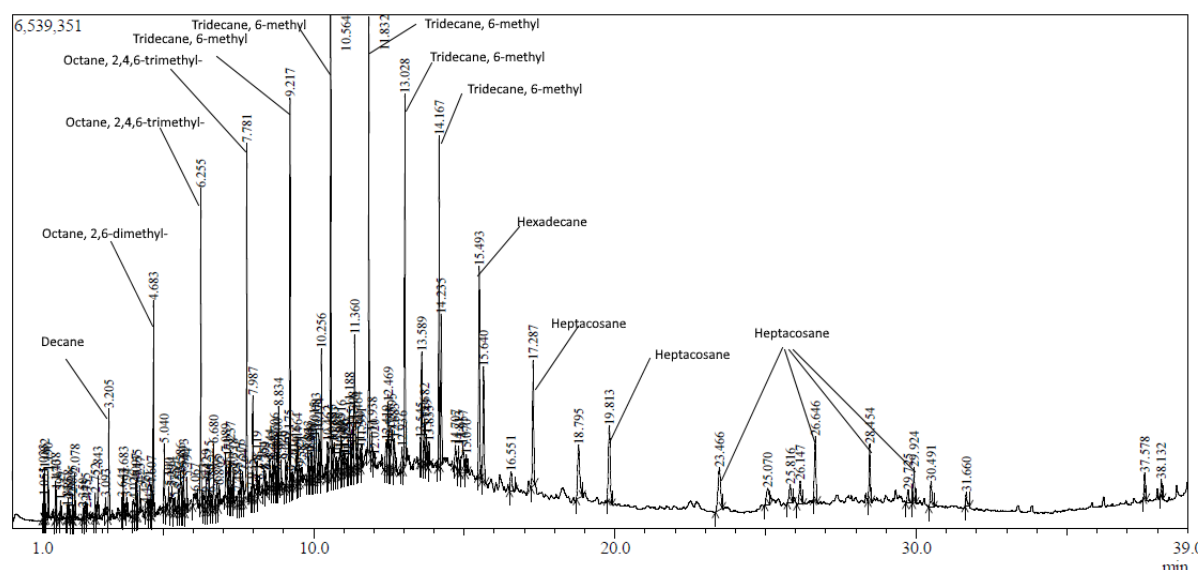


Рис. 3. Химический состав верхней органической части пиролизной жидкости бурового шлама
Fig. 3. Chemical composition of the upper organic part of the pyrolysis fluid of boring sludge

Таблица 5. Свойства твердого продукта пиролиза бурового шлама
Table 5. Properties of solid product of boring sludge pyrolysis

Показатель	Значение
Зольность	92,89
Летучие вещества, %	6,38
Нелетучий углерод, %	0,72

На основании этих результатов можно сделать выводы, что жидкий продукт пиролиза бурового шлама с выходом 23,39% содержит достаточно широкий спектр углеводородов, что указывает на его потенциал в качестве источника сырья для различных промышленных процессов. Высокое содержание длинноцепочечных алканов предполагает возможность использования органической части пиролизной жидкости бурового шлама в качестве топлива, что подтверждается высоким значением теплоты сгорания верхней органической части.

Твёрдый продукт пиролиза является основным продуктом процесса (75,24%), не имеет запаха, достаточно инертен, в виду температурной обработки не содержит патогенных компонентов. Можно предположить, что зола твердого продукта пиролиза бурового шлама в основном состоит из минеральной части выбуренной породы и не является инородным токсичным веществом для почв.

Заключение

В лабораторных условиях был проведен пиролиз бурового шлама, в ходе которого были получены и отобраны жидкие и твёрдые продукты. Пиролизная жидкость состоит на более чем 80% из органических соединений, из которых 61% составляют углеводоро-

ды класса алканов. Данная органическая часть предлагается для использования в качестве топлива для запуска и поддержания процесса пиролиза, что позволяет промышленной установке пиролиза работать автономно на местах бурения скважин. Неорганическая нижняя часть пиролизной жидкости на более чем 94 % состоит из воды, которую можно повторно применять при приготовлении буровых растворов.

Твёрдые продукты пиролиза буровых шламов могут быть использованы в различных областях, например в строительстве, в качестве добавок к строительным материалам, таким как бетон или асфальт. В сельском хозяйстве они могут использоваться как удобрения или почвообразующие материалы благодаря содержанию питательных веществ и минералов, но только после оценки содержания токсичных соединений и тяжёлых металлов. Помимо этого, простое захоронение твёрдых продуктов пиролиза буровых шламов несёт в себе значительно меньшую нагрузку на окружающую среду, так как является инертным элементом выбуренной породы.

Различные методы утилизации буровых шламов имеют свои преимущества и ограничения. Пиролиз бурового шлама представляет собой перспективный способ переработки, позволяющий получить вторичные продукты с высокой эффективностью. Помимо этого, пиролиз позволяет значительно снизить объём отхода и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Процесс пиролиза может быть экономически оправдан за счёт возможности использования жидких продуктов для поддержания процесса или для выработки энергии для других целей.

Для дальнейших исследований и практического применения метода пиролиза для утилизации буровых шламов планируется фронт работ, связанных с подбором оптимальных условий пиролиза для повы-

шения выхода ценных продуктов. Важно провести оценку содержания тяжёлых металлов в твёрдом продукте и присвоения класса опасности. Также требуется дать более точную оценку экономической эффективности процесса пиролиза и разработать модели для оценки затрат и потенциальной прибыли, исследовать возможности использования полученных продуктов в различных отраслях промышленности, таких как энергетика, строительство и химическая промышленность.

Список источников

1. Оценка токсичности буровых шламов / Л.П. Капелькина, М.В. Чугунова, Т.В. Бардина и др. // Токсикологический вестник. 2013. №6 (123). С. 46-51.
2. Климова А.А., Языков Е.Г., Азарова С.В. Содержание химических элементов и оценка токсичности бурового шлама нефтяных месторождений Томской области // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материалы III Международной школы-семинара молодых исследователей. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2018. С. 353-356.
3. Картушина Ю.Н., Кваша К.А., Аракчеева А.Н. Утилизация буровых шламов с использованием минеральных сорбентов // Инновации и инвестиции. 2023. №6. С. 156-159. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-burovyh-shlamov-s-ispolzovaniem-mineralnyh-sorbentov> (дата обращения: 02.04.2024).
4. Пат. 48979 Российская Федерация, МПК C02F 11/00. Установка для сушки и обжига бурового шлама / С.А. Шакиров; заявитель и правообладатель «Шакиров Салават Ахатович». № 2005120407/22; заявл. 30.06.2005; опубл. 10.11.2005.
5. Пат. 87107 Российская Федерация, МПК B09B 3/00. Комплекс двойного обезвреживания и утилизации бурового шлама / В.М. Горин, М.К. Кабанова, И.К. Казмалы [и др.]; заявитель и патентообладатель ЗАО «НИИКерамзит». № 2009122099/22; заявл. 10.06.2009; опубл. 27.09.2009.
6. Пат. 2422347 Российская Федерация, МПК B65G 5/00. Способ подземного захоронения буровых отходов в многолетнемерзлых породах / Н.А. Гафаров, А.А. Рябokonь, О.И. Савич [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Подземгазпром». № 2009148161/03; заявл. 25.12.2009; опубл. 27.06.2011.
7. Прогнозное моделирование гидравлического разрыва пласта алюмосиликатными пропантантами, изготовленными на основе буровых шламов / Третьяк А.А., Яценко Е.А., Доронин С.В., Борисов К.А., Кузнецова А.В. // Известия ТПУ. 2023. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proгнозное-modelirovanie-gidravlichesкого-razryva-plasta-alyumosilikatnymi-propantami-izgotovlennymi-na-osnove-burovyh-shlamov> (дата обращения: 02.04.2024).
8. Малиновская Л.В., Перевалов С.Н. Комплексный подход к обезвреживанию высокоминерализованных отходов бурения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 3. С. 27-31.
9. Пичугин Е.А. Закономерности получения стабилизированных геоэкологически устойчивых грунтовых смесей на основе буровых шламов: дис. ... канд. тех. наук. Пермь, 2019. 183 с.
10. Воробьева С.Ю., Шпинькова М.С., Мерициди И.А. Переработка нефтешламов, буровых шламов, нефтезагрязненных грунтов методом реагентного капсулирования // Территория Нефтегаз. 2011. №2. С. 68-71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererabotka-nefteshlamov-burovyh-shlamov-neftezagryaznennyh-gruntov-metodom-reagentnogo-kapsulirovaniya> (дата обращения: 02.04.2024).
11. An effective treatment method for shale gas drilling cuttings solidified body / Liu DS, Wang CQ, Mei XD, Qian-Huang, Ding SM // Environ Sci Pollut. 2019, no. 26(17), pp. 17853-17857. DOI: 10.1007/s11356-019-05273-0
12. Utilization of oil-based mud drilling cuttings wastes from shale gas extraction for cement clinker production / Lai H, Lv S, Lai Z, Liu L, Lu Z. // Environ Sci Pollut. 2020, no. 27(26), pp. 33075-33084. DOI: 10.1007/s11356-020-09541-2.
13. The use of oil-based mud cuttings as an alternative raw material to produce high sulfate-resistant oil well cement / Abdul-Wahab S. A. et al. // Journal of cleaner production. 2020, 269, 122207.
14. Оценка воздействия на компоненты окружающей среды буровых шламов, накопленных на нефтегазовых месторождениях, и прогноз изменения качества окружающей среды при их утилизации: отчет о НИР / Б.Е. Шенфельд, В.Е. Шапкин, Н.В. Костылева и др. Пермь: ФГБУ УралНИИ «Экология». 2014. 282 с.
15. Пат. 2491135 Российская Федерация, МПК B09B 1/00. Смесь почвенная шламово-грунтовая (варианты) для рекультивации нарушенных земель и способ рекультивации карьеров и нарушенных земель / И.Н. Кольцов, Н.Г. Митрофанов, В.С. Петухова, Л.Н. Скипин; патентообладатель ООО «Салым Петролеум Девелопмент». № 2011152564/13; заявл. 23.12.2011; опубл. 27.08.2013.
16. Мельник И. В., Чиник И. И. Детоксикация отработанных буровых растворов и буровых шламов // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2008. № 3. С. 166-169.
17. Чуктуров Г.К., Санников Р.Х., Багаутдинов Р.Р. Безамбарное бурение как способ решения экологических проблем // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2012. № 11. С. 36-40.
18. Комплексная система обработки и утилизации буровых шламов при помощи фильтрующих оболочек / Н.А. Сафонова, О.В. Тупицына, К.Л. Чертес и др. // Экология и промышленность России. 2013. № 7. С. 11-17.
19. Синтез и свойства фенолоформальдегидных смол из продуктов термической переработки древесины / Валиуллина А.И., Грачев А.Н., Валеева А.Р. и др. // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 5. С. 2-11. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-5-2-111
20. Переработка отходов скорлупы фундука методом быстрого абляционного пиролиза / А.И. Валиуллина, А.Р. Валеева, С.А. Забелкин и др. // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3(55). С. 111-115. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-111-115

21. Effect of molar ratios of phenol, formaldehyde, and catalyst on the properties of phenol-formaldehyde resin with partial replacement of synthetic phenol with depolymerized lignocellulose biomass / A.I. Valiullina, A.R. Valeeva, S.A. Zabelkin [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. DOI: 10.1007/s13399-021-02071-y.
22. Валеева А.Р. Применение жидких продуктов быстрого пиролиза древесных отходов в качестве компонента фенолоформальдегидных смол: специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины»: дис. ... канд. техн. наук / Валеева Айгуль Раисовна. Казань, 2022. 155 с.
23. The Use of Biopolyols Obtained from Liquid Birch Sawdust Pyrolysis Products as a Renewable Component in the Production of Rigid Polyurethane Foams / A.I. Valiullina, A.N. Grachev, A.R. Valeeva [et al.] // Polymer Science, Series D. 2022, vol. 15, no. 2, pp. 300-305. DOI: 10.1134/S1995421222020307.
24. Catalytic pyrolysis of oil-based drill cuttings over metal oxides: the product properties and environmental risk assessment of heavy metals in char / Lv Q. et al. // Process Safety and Environmental Protection. 2022. T. 159. С. 354-361.
25. Lv Q. et al. Pyrolysis of oil-based drill cuttings from shale gas field: Kinetic, thermodynamic, and product properties // Fuel. 2022, vol. 323, pp. 124332.
26. Ержанова Н.С., Кузьмина Р.И., Кунашева З.Х. Исследование свойств твердого остатка пиролиза бурового шлама // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 6. С. 64-68.
27. Иванов А.В., Вильдяйкин С.Н., Истомин Ю.А. Оценка возможности утилизации бурового шлама пиролизом // Молодой ученый года – 2022: сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 18-22.
28. Co-pyrolysis of waste polyvinyl chloride and oil-based drilling cuttings: Pyrolysis process and product characteristics analysis / Xia Z. et al. // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 318, pp. 128521.
29. Oil-based drilling cuttings pyrolysis residues at a typical shale gas drilling field in Chongqing: pollution characteristics and environmental risk assessment / Chen X. et al. // Environmental Geochemistry and Health. 2023, vol. 45, no. 6, pp. 2949-2962.
3. Kartushina Yu.N., Kvasha K.A., Arakcheeva A.N. Utilization of drilling waste using mineral sorbents. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], 2023;(6):156-159. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-burovyh-shlamov-s-ispolzovaniem-mineralnyh-sorbentov> (Accessed April 2, 2024). (In Russ.)
4. Shakirov S.A. *Ustanovka dlya sushki i obzhiga burovogo shlama* [Installation for drying and calcining drilling waste]. Patent RF, no. 48979, 2005.
5. Gorin V.M., Kabanova M.K., Kazmaly I.K., et al. *Kompleks dvoynogo obezvrezhivaniya i utilizatsii burovogo shlama* [Complex for dual detoxification and utilization of drilling waste]. Patent RF, no. 87107, 2009
6. Gafarov N.A., Ryabokon A.A., Savich O.I., et al. *Sposob podzemnogo zakhoroneniya burovyykh otkhodov v mnogoletemerzlykh porodakh* [Method of underground disposal of drilling waste in permafrost]. Patent RF, no. 2422347, 2011.
7. Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Doronin S.V., Borisov K.A., Kuznetsova A.V. Predictive modeling of hydraulic fracturing with aluminosilicate proppants made from drilling waste. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2023;3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/proгнозноe-modelirovanie-gidravlicheskogo-razryva-plastalyumosilikatnymi-propantami-izgotovlennymi-na-osnove-burovyh-shlamov> (Accessed April 2, 2024). (In Russ.)
8. Malinovskaya L.V., Perevalov S.N. Comprehensive approach to the detoxification of highly mineralized drilling waste. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in the Oil and Gas Complex], 2015;3:27-31. (In Russ.)
9. Pichugin E.A. *Zakonomernosti polucheniya stabilizirovannykh geoeologicheskii ustoichivyykh gruntovykh smesey na osnove burovyykh shlamov*: diss. ... kand. tekhn. nauk [Patterns of obtaining stabilized geoeologically stable soil mixtures based on drilling waste. Ph.D. dissertation]. Perm, 2019, 183 p. (In Russ.)
10. Vorobyeva S.Yu., Shpinkova M.S., Meritsidi I.A. Processing of oil sludge, drilling waste, and oil-contaminated soil by reagent encapsulation. *Territoriya Neftegaz* [Oil and Gas Territory], 2011;2:68-71. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererabotka-nefteshlamov-burovyh-shlamov-neftezagryaznennykh-gruntov-metodom-reagentnogo-kapsulirovaniya> (Accessed April 2, 2024). (In Russ.)
11. Liu D.S., Wang C.Q., Mei X.D., Qian-Huang, Ding S.M. An effective treatment method for shale gas drilling cuttings solidified body. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2019;26(17):17853-17857. DOI: 10.1007/s11356-019-05273-0.
12. Lai H., Lv S., Lai Z., Liu L., Lu Z. Utilization of oil-based mud drilling cuttings wastes from shale gas extraction for cement clinker production. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2020;27(26):33075-33084. DOI:10.1007/s11356-020-09541-2.
13. Abdul-Wahab S.A. et al. The use of oil-based mud cuttings as an alternative raw material to produce high sulfate-resistant oil well cement. *Journal of Cleaner Production*. 2020;269:122207.

References

1. Kapelkina L.P., Chugunova M.V., Bardina T.V., et al. Toxicity assessment of drilling waste. *Toksikologicheskii vestnik* [Toxicological Bulletin], 2013;6(123):46-51. (In Russ.)
2. Klimova A.A., Yazikov E.G., Azarova S.V. Chemical element content and toxicity assessment of drilling waste from oil fields in the Tomsk region. *Biogekhimiya khimicheskikh elementov i soedinenii v prirodnykh sredakh: materialy III Mezhdunarodnoi shkoly-seminara molodykh issledovatelei* [Biogeochemistry of Chemical Elements and Compounds in Natural Environments. Proceedings of the 3rd International School-Seminar for Young Researchers]. Tyumen: Tyumen State University, 2018, pp. 353-356. (In Russ.)

14. Shenfeld B.E., Shapkin V.E., Kostyleva N.V., et al. Otsenka vozeistviya na komponenty okruzhayushchey sredy burovnykh shlamov, nakoplenykh na neftegazovykh mestorozhdeniyakh, i prognoz izmeneniya kachestva okruzhayushchei sredy pri ikh utilizatsii [Assessment of the impact of drilling waste accumulated at oil and gas fields on environmental components and forecast of environmental quality changes during their utilization]. Perm: FGBU UralNII "Ekologiya", 2014, 282 p. (In Russ.)
15. Koltsov I.N., Mitrofanov N.G., Petukhova V.S., Skipin L.N. Smes pochvennaya shlamovo-gruntovaya (varianty) dlya rekultivatsii narushennykh zemel i sposob rekultivatsii karerov i narushennykh zemel [Soil-sludge mixture (variants) for reclamation of disturbed lands and method of quarry and disturbed land reclamation]. Patent RF, no. 2491135, 2013.
16. Melnik I.V., Chinik I.I. Detoxification of spent drilling fluids and drilling waste. *Neftegazovye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost* [Oil and Gas Technologies and Environmental Safety], 2008;3:166-169. (In Russ.)
17. Chukturov G.K., Sannikov R.Kh., Bagautdinov R.R. Zero-discharge drilling as a solution to environmental problems. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea], 2012;(11):36-40. (In Russ.)
18. Safonova N.A., Tupitsyna O.V., Chertes K.L., et al. Comprehensive system for processing and disposal of drilling waste using filter shells. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013;(7):11-17. EDN QDFEJH. (In Russ.)
19. Valiullina A.I., Grachev A.N., Valeeva A.R., et al. Synthesis and properties of phenol-formaldehyde resins from wood thermal processing products. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. [Adhesives. Sealants. Technologies], 2022;(5): 2-11. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-5-2-111. (In Russ.)
20. Valiullina A.I., Valeeva A.R., Zabelkin S.A., et al. Processing of hazelnut shell waste by rapid ablative pyrolysis. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [System. Methods. Technologies], 2022;3(55):111-115. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-111-115. (In Russ.)
21. Valiullina A.I., Valeeva A.R., Zabelkin S.A., et al. Effect of molar ratios of phenol, formaldehyde, and catalyst on the properties of phenol-formaldehyde resin with partial replacement of synthetic phenol with depolymerized ligno-cellulose biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021. DOI 10.1007/s13399-021-02071-y.
22. Valeeva A.R. Primenenie zhidkikh produktov bystrogo piroliza drevesnykh othodov v kachestve komponenta fenoloformaldegidnykh smol: dis. ... kand. tekhn. nauk [Application of liquid products of rapid pyrolysis of wood waste as a component of phenol-formaldehyde resins. Ph.D. dissertation]. Kazan, 2022, 155 p.
23. Valiullina A.I., Grachev A.N., Valeeva A.R., et al. The Use of Biopolyols Obtained from Liquid Birch Sawdust Pyrolysis Products as a Renewable Component in the Production of Rigid Polyurethane Foams. *Polymer Science, Series D*. 2022;15(2):300-305. DOI: 10.1134/S1995421222020307.
24. Lv Q., et al. Catalytic pyrolysis of oil-based drill cuttings over metal oxides: the product properties and environmental risk assessment of heavy metals in char. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;159:354-361.
25. Lv Q., et al. Pyrolysis of oil-based drill cuttings from shale gas field: Kinetic, thermodynamic, and product properties. *Fuel*. 2022;323:124332.
26. Erzhanova N.S., Kuzmina R.I., Kunasheva Z.Kh. Study of the properties of solid residue from pyrolysis of drilling waste. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2021;24(6):64-68. EDN CRULFS. (In Russ.)
27. Ivanov A.V., Vildyaykin S.N., Istomin Yu.A. Assessment of the possibility of drilling waste disposal by pyrolysis. *Molodoy ucheniy goda 2022: Sbornik statei II Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa* [Young Scientist of the Year 2022. Proceedings of the 2nd International Scientific Research Competition]. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2022, pp. 18-22. EDN SMWEMR. (In Russ.)
28. Xia Z., et al. Co-pyrolysis of waste polyvinyl chloride and oil-based drilling cuttings: Pyrolysis process and product characteristics analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2021;318:128521.
29. Chen X., et al. Oil-based drilling cuttings pyrolysis residues at a typical shale gas drilling field in Chongqing: pollution characteristics and environmental risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023;45(6):2949-2962.

Поступила 07.03.2025; принята к публикации 05.05.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 07/03/2025; revised 05/05/2025; published 30/09/2025

Валеева Айгуль Раисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры ХТД, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия; ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: a8695v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-8656-7643

Хазиахмедова Римма Маратовна – старший преподаватель кафедры ХТД, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: rimmo4ka_0694@mail.ru. ORCID 0000-0002-9278-816X

Валиуллина Альмира Иршатовна – старший преподаватель кафедры ХТД, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: almi.sabirzyanova@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0909-9126

Забелкин Сергей Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ХТД,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: szabelkin86@gmail.com. ORCID 0000-0003-1349-6669

Грачев Андрей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры ХТД
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: energolesprom@gmail.com. ORCID 0000-0001-9790-4564

Киселев Дмитрий Юрьевич – инженер кафедры ХТД,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: dmskkiselev@gmail.com.

Aigul R. Valeeva – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
TO BIO LLC, Moscow, Russia.
Email: a8695v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-8656-7643

Rimma M. Khaziakhmedova – Senior Lecturer of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: rimmo4ka_0694@mail.ru. ORCID 0000-0002-9278-816X

Almira I. Valiullina – Senior Lecturer of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: almi.sabirzyanova@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0909-9126

Sergey A. Zabelkin – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
TO BIO LLC, Moscow, Russia.
Email: szabelkin86@gmail.com. ORCID 0000-0003-1349-6669

Andrey N. Grachev – DrSc(Eng.), Professor of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
TO BIO LLC, Moscow, Russia.
Email: energolesprom@gmail.com. ORCID 0000-0001-9790-4564

Dmitry Y. Kiselev – Engineer of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
TO BIO LLC Moscow, Russia.
Email: dmskkiselev@gmail.com.