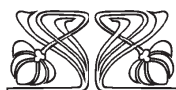
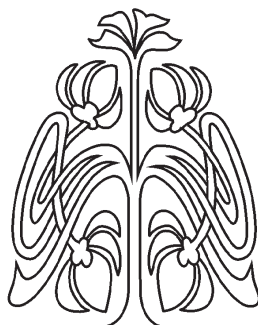
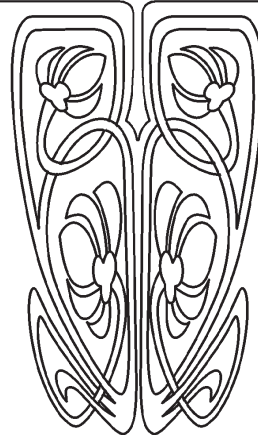




ХИМИЯ



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 4–12

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 4–12

<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-4-12>

EDN: AJGSAM

Научная статья
УДК 544.015.4

Жидкие продукты термообработки органо-минерального осадка: химическая характеристика и топливные свойства

Р. Н. Кубашева¹✉, Н. С. Ержанова¹, 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

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

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

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. В данной работе представлены результаты комплексного исследования жидких продуктов, образующихся в процессе термической обработки органо-минерального осадка. Основное внимание уделено определению химического состава, установлению фракционного распределения и оценке топливных характеристик полученной жидкой фракции. Методы газовой хроматографии, инфракрасной спектроскопии и элементного анализа позволили получить детальную характеристику продукта. Установлено, что жидкая фракция обогащена изопарафиновыми, ароматическими, нафтеновыми и олефиновыми углеводородами, при этом содержание парафинов составляет 5,2 мас. %, а оксигенатов – 4,5 мас. %. Химическая природа соединений указывает на протекание процессов термической деструкции органической части осадка с последующей вторичной конденсацией летучих продуктов. Детализированный хроматографический анализ показал, что легкая фракция жидкого продукта содержит значительные количества толуола (10,96 мас. %), этилбензола (3,06 мас. %), о-ксилола (3,75 мас. %), триметилбензола (4,19 мас. %), а также изопарафиновых углеводородов – 2,3,5-триметилгексана (5,20 мас. %) и *i*-бутилциклопентана (5,77 мас. %). Дополнительно присутствуют нафтеновые соединения с различной длиной цепи (C₇-C₁₇) и арены (C₁₁-C₁₈), что формирует разнообразный углеводородный профиль жидкой фракции. Фракционирование жидкого продукта показало, что легкокипящая часть (до 100°C) характеризуется высокими октановыми числами: 76,8 по моторному методу и 93,3 по исследовательскому методу. Наибольший вклад в октановое число вносят изопарафины (38,1 по исследовательскому методу) и ароматические соединения (33,5), тогда как доля парафинов, олефинов и оксигенатов существенно ниже.



Таким образом, жидкая фракция, получаемая при термической обработке органо-минерального осадка, обладает комплексом характеристик, близких к моторным топливам, и может рассматриваться как перспективный источник альтернативного топлива либо как сырьё для дальнейшего химического синтеза. Представленные результаты демонстрируют возможность эффективного использования органо-минеральных отходов в энергетике и химической промышленности.

Ключевые слова: термическая обработка, органо-минеральный осадок, жидкий продукт, фракционный состав, групповой состав, углеводороды, изопарафины, ароматические соединения, нафтены, олефины, октановое число, газовая хроматография

Для цитирования: Кубашева Р. Н., Ержанова Н. С., Кузьмина Р. И., Кунашева З. Х. Жидкие продукты термообработки органо-минерального осадка: химическая характеристика и топливные свойства // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 4–12. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-4-12>, EDN: AJGSAM

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

Article

Liquid products of thermal treatment of organo-mineral sludge: Chemical characterization and fuel properties

R. N. Kubasheva¹ ✉, N. S. Yerzhanova¹, 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

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

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

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. This study presents the results of a comprehensive investigation of liquid products obtained during the thermal treatment of organo-mineral sludge. The main focus is placed on determining the chemical composition, establishing fractional distribution, and evaluating the fuel characteristics of the resulting liquid fraction. A set of analytical methods, including gas chromatography, infrared spectroscopy, and elemental analysis, has been employed to provide a detailed characterization of the product. It has been established that the liquid fraction is enriched with isoparaffinic, aromatic, naphthenic, and olefinic hydrocarbons, while paraffins (5,2 wt.%) and oxygenates (4,5 wt.%) are present in smaller amounts. The chemical composition indicates the occurrence of complex thermal degradation processes of the organic part of the sludge, followed by secondary condensation of volatile products. Chromatographic analysis of the light fraction revealed significant contents of toluene (10,96 wt.%), ethylbenzene (3,06 wt.%), o-xylene (3,75 wt.%), and 1,2,4-trimethylbenzene (4,19 wt.%). In addition, isoparaffinic hydrocarbons such as 2,3,5-trimethylhexane (5,20 wt.%) and *i*-butylcyclopentane (5,77 wt.%) have been identified, along with naphthenic compounds (C₇-C₁₇) and arenes (C₁₁-C₁₈), forming a diverse hydrocarbon profile of the liquid fraction. Fractionation of the liquid product showed that the light fraction (up to 100°C) is characterized by high octane numbers: 76,8 by the motor method and 93,3 by the research method. The main contribution to the octane number comes from isoparaffins (38,1 by the research method) and aromatic compounds (33,5), while the share of paraffins, olefins, and oxygenates is significantly lower. Thus, the liquid fraction obtained from the thermal treatment of organo-mineral sludge exhibits properties comparable to motor fuels and may be considered both as a promising alternative fuel and as a feedstock for chemical synthesis. These findings highlight the potential of utilizing organo-mineral wastes as secondary energy resources within sustainable waste-to-energy technologies.

Keywords: thermal treatment, organo-mineral sludge, liquid product, fractional composition, group composition, hydrocarbons, isoparaffins, aromatic compounds, naphthenes, olefins, octane number, gas chromatography

For citation: Kubasheva R. N., Yerzhanova N. S., Kuzmina R. I., Kunasheva Z. Kh. Liquid products of thermal treatment of organo-mineral sludge: Chemical characterization and fuel properties. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 4–12 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-1-4-12>, EDN: AJGSAM

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

Введение

Жидкие продукты, образующиеся в результате термической обработки органо-минеральных осадков, представляют собой сложные многокомпонентные системы, включающие широкий спектр углеводородов и кислородсодержащих соединений. Их химическая природа и топливные свойства определяются исходным составом сырья и режимами термообработки. Согласно литературным данным, получаемая жидкая фракция по своим характеристикам со-

поставима с традиционными углеводородными топливами и при соответствующей доочистке может рассматриваться в качестве альтернативного источника энергии [1–3].

Современные исследования указывают, что в составе жидких продуктов термической переработки осадков сточных вод преобладают ароматические углеводороды, изопарафины, нафтены и олефины, при этом фиксируется присутствие кислородсодержащих соединений и небольших количеств парафинов [4, 5]. Подобный компонентный состав был установлен в ряде



экспериментальных работ с использованием газовой хроматографии и масс-спектрометрии, что подтверждает универсальность процессов термической деструкции органической части осадка и последующей вторичной конденсации летучих соединений [6–8].

Особое внимание в зарубежных исследованиях уделяется оценке топливных характеристик легких фракций жидкого продукта. Так, работы по термической обработке отходов нефтепроизводства демонстрируют, что октановое число легкокипящей фракции может достигать 90–95 по исследовательскому методу, что сопоставимо с бензиновыми фракциями нефтяного происхождения [9, 10]. При этом вклад различных классов соединений в октановое число варьирует: изопарафины и ароматические углеводороды обеспечивают основной вклад, в то время как нафтены и парафины снижают этот показатель [11].

Термическая обработка органо-минерального осадка сопровождается сложными физико-химическими процессами, протекающими в несколько взаимосвязанных стадий. Их результатом является образование жидкой фракции, включающей широкий спектр алифатических, ароматических, нафтеновых и кислородсодержащих соединений.

Образование жидкой фракции при термической обработке органо-минерального осадка происходит через последовательные реакции термолитического крекинга, изомеризации, дегидрирования и конденсации, что приводит к получению сложной смеси алифатических, ароматических, нафтеновых и кислородсодержащих соединений [12].

Таким образом, анализ опубликованных данных позволяет сделать вывод о высокой перспективности исследований жидкой фазы, образующейся при термической обработке органо-минеральных осадков. Систематизация результатов по её составу и топливным свойствам не только способствует развитию технологий переработки отходов, но и формирует научные основы для создания альтернативных видов топлива и сырья для химической промышленности.

Материалы и методы

В продолжение анализа актуальности использования жидких продуктов термической обработки органо-минеральных осадков в ка-

честве вторичных энергетических ресурсов, в данной работе объектом исследования выбран жидкий продукт, полученный при термической обработке органо-минерального осадка. Основное внимание уделялось его компонентному составу и топливным характеристикам.

Газовая хроматография

Для проведения исследования отобран образец органо-минерального осадка, подвергнутый термической обработке при контролируемых условиях. Полученный жидкий продукт был предварительно очищен от механических примесей и влаги с целью исключения влияния посторонних факторов на результаты анализа.

Анализ углеводородного состава жидкой фракции осуществлялся с применением газового хроматографа «Кристалл-5000», работающего в режиме линейного программирования температуры в диапазоне от 35°C до 250°C. В качестве детектора использован пламенно-ионизационный детектор (ПИД), обеспечивающий высокую чувствительность к органическим соединениям.

Идентификация компонентов проводилась на основе логарифмических индексов удерживания с сопоставлением полученных значений с табличными данными для углеводородов различных классов. Количественный анализ осуществлялся с применением программы «Хроматэк Аналитик», позволяющей рассчитывать концентрации компонентов, среднюю молекулярную массу, относительную плотность, давление насыщенных паров и температуру выкипания.

Определение топливных характеристик выполнялось по совокупности полученных данных. Октановое число рассчитывалось как по исследовательскому, так и по моторному методу, что обеспечило достоверную оценку топливных свойств легкой фракции жидкого продукта. Для оценки воспроизводимости измерений каждый эксперимент проводился в трёхкратной повторности, а результаты усреднялись [12].

Расчёт октанового числа смеси

Для расчёта октанового числа (ОЧ) смеси применяется хроматографический метод с использованием данных о составе легкой фракции жидкого продукта. Если в наличии площади пиков S_i и известны коэффициенты ответа (факторы детектирования) F_i , массовые доли w_i компонентов рассчитывают по формуле [13]:

$$w_i = (S_i / F_i) / \sum(S_j / F_j).$$



Если факторы ответа неизвестны и принято приближение одинаковой чувствительности, можно использовать $F_i = 1$.

Результаты и их обсуждение

Полученный в результате термической обработки органо-минерального осадка жидкий продукт после отстаивания разделился на два слоя. Верхний слой представлял собой жёлтую маслянистую жидкость с характерным неприятным запахом, тогда как нижний слой имел более светло-жёлтый оттенок, был менее вязким и отличался резко выраженным, резким запахом. В ходе отстаивания также зафиксировано выделение газовой фазы над жидкостью. Анализ газов показал щелочную реакцию (рН 11–12 при контакте с влажной индикаторной бумагой), что указывает на присутствие газообразных азот- и кислородсодержащих соединений, формирующих специфический запах.

Для исследования компонентного состава жидкий продукт подвергался фракционированию на установке атмосферной разгонки нефти. В ходе эксперимента удалось выделить одну фракцию в интервале температур 75–100°C. Повышение температуры выше данного диапазона приводило к вспениванию вязкого остатка без выделения дополнительных летучих фракций. Полученный остаток при комнатной температуре представлял собой высоковязкую чёрную субстанцию, обладающую горючестью. При сжигании наблюдалось неполное горение с выделением сажи, что, вероятно, обусловлено присутствием в его составе конденсированных высокоуглеродистых систем.

Компонентный состав верхнего слоя жидкого продукта был исследован методом газовой хроматографии на приборе «Кристалл-5000» с использованием пламенно-ионизационного детектора.

Высокая доля изопарафиновых (24,0 мас. %) и ароматических углеводородов (26,3 мас. %) в составе лёгкой фракции свидетельствует о значительном потенциале исследуемого продукта как топлива. Известно, что изопарафины и арены играют ключевую роль в формировании высоких октановых чисел, что подтверждает перспективность их использования в составе моторных топлив. Наличие нафтеновых соединений (7,1 мас. %) дополнительно повышает стабильность горения, однако их энергетическая эффективность ниже по сравнению с аренами и изопарафинами.

В то же время присутствие олефинов (3,6 мас. %) и кислородсодержащих компонентов (0,2 мас. %) указывает на склонность продукта к химической нестабильности, что может проявляться в процессе хранения (полимеризация, смолообразование). Это обуславливает необходимость проведения последующей доочистки или гидрообработки для улучшения эксплуатационных характеристик топлива.

Фракционный анализ жидкого продукта показал, что начальная температура кипения составляет 72,7°C, что указывает на присутствие лёгких углеводородов, в основном низкомолекулярных аренов и изопарафинов. Уже при отгоне 10–20% фиксируются температуры 109–119°C, что соответствует диапазону бензиновых фракций (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Температурные характеристики фракционного состава жидкого продукта
Temperature characteristics of the fractional composition of the liquid product

Отгон, % / Distillate, %	Температура, °C / Temperature, °C	Отгон, % / Distillate, %	Температура, °C / Temperature, °C
0,5	72,735	55,0	150,369
5,0	100,970	60,0	157,009
10,0	109,470	65,0	163,771
15,0	114,125	70,0	170,655
20,0	118,923	75,0	179,187
25,0	123,801	80,0	188,291
30,0	128,376	85,0	198,298
35,0	132,544	90,0	219,907
40,0	136,768	95,0	262,549
45,0	141,047	98,0	348,784
50,0	145,381	99,5	370,510



С ростом температуры отмечается плавный отгон компонентов, относящихся к среднекипящим фракциям: при 50% отгона температура достигает 145,4°C, а при 75% – 179,2°C. Такой профиль характерен для углеводородов бензинового ряда с высокой концентрацией изопарафинов и аренов, что согласуется с результатами хроматографического анализа.

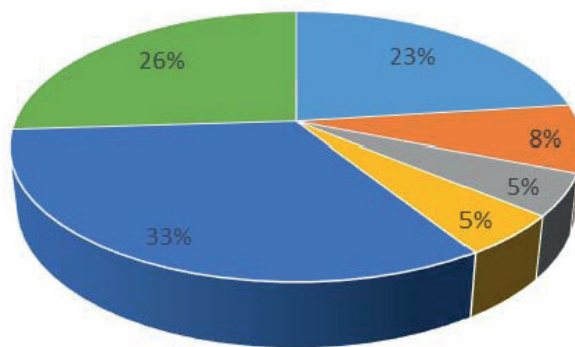
Дальнейшее повышение температуры сопровождается выделением более тяжёлых углеводородов: при 90% отгона температура составляет 219,9°C, а при 95% достигает 262,5°C, что свидетельствует о присутствии керосиновых и дизельных фракций. Данная температура кипения (370,5°C при 99,5% отгона) указывает на наличие тяжёлых ароматических соединений и конденсированных структур, образующих высококипящий остаток.

Исследуемый жидкий продукт характеризуется широким интервалом выкипания (72–370°C), охватывающим бензиновые, керосиновые и частично дизельные фракции. Основная масса углеводородов сконцентрирована в диапазоне 100–200°C, что определяет его топливный потенциал как аналога моторных бензинов. Однако наличие значительного количества высококипящих компонентов (до 20% от массы) требует дополнительной очистки или каталитической переработки для стабилизации свойств и улучшения эксплуатационных характеристик топлива.

Групповой состав жидкого продукта свидетельствует о его сложной и многокомпонентной природе (рис. 1). Наибольшая доля приходится на изопарафиновые углеводороды (32,8 мас. %), что является положительным фактором с точки зрения топливных характеристик. Известно, что именно изопарафины обеспечивают высокий уровень детонационной стойкости и формируют значительный вклад в октановое число моторных топлив.

Вторую по величине группу составляют ароматические углеводороды (25,6 мас. %). Их присутствие также способствует повышению октанового числа, однако избыточное содержание ароматических соединений может приводить к экологическим ограничениям вследствие увеличения токсичности выхлопных газов.

Значительная доля приходится на нефтяные углеводороды (23,4 мас. %), которые, с одной стороны, обеспечивают хорошие смазывающие свойства и высокую теплопроводную способность, а с другой – несколько



- Нафтены/ Naphthenes
- Олефины/ Olefins
- Оксигенаты / Oxygenates
- Парафины/ Paraffins
- Изопарафины / Isoparaffins
- Ароматика / Aromatics

Рис. 1. Групповой состав жидкого продукта (цвет онлайн)

Fig. 1. Group composition of the liquid product (color online)

снижают устойчивость топлива к детонации по сравнению с изопарафинами. Тем не менее их присутствие делает продукт более универсальным по свойствам. Содержание олефинов (8,5 мас. %) указывает на наличие ненасыщенных углеводородов, которые характеризуются высокой реакционной способностью. Это может негативно влиять на стабильность хранения топлива из-за склонности к полимеризации и образованию смолистых веществ. Небольшое количество парафиновых соединений (5,2 мас. %) снижает общую детонационную стойкость, однако их присутствие в ограниченных пределах является типичным для продуктов термокаталитических процессов. Оксигенаты (4,5 мас. %) формируются в результате частичной дегидратации и окисления органической составляющей осадка; хотя их содержание невелико, они могут способствовать коррозионной активности и снижать долговечность оборудования при прямом использовании продукта в качестве топлива.

Совокупность группового состава указывает на то, что жидкий продукт по своим характеристикам близок к углеводородным системам моторного топлива. Высокая доля изопарафинов и ароматических углеводородов позволяет рассматривать его в качестве перспективного компонента для производства бензинов, однако для практического применения необходимы дополнительные стадии очистки и стабилизации с целью снижения доли олефинов и кислородсодержащих соединений.



Проведённый хроматографический анализ легкой фракции позволил уточнить природу отдельных углеводородов (табл. 2). Было установлено, что значительную часть состава формируют ароматические соединения – толуол (10,96 мас. %), этилбензол (3,06 мас. %) и о-ксилол (3,75 мас. %), которые являются

типичными компонентами моторных бензинов и обеспечивают высокие антидетонационные свойства. Среди изопарафинов доминируют 2,3,5-триметилгексан (5,20 мас. %), 2,3-диметилгептан (4,28 мас. %) и 2,3-диметилоктан (4,21 мас. %), что также положительно отражается на октановых характеристиках продукта.

Таблица 2 / Table 2

Основные индивидуальные углеводородные компоненты легкой фракции жидкого продукта
Main individual hydrocarbon components of the light fraction of the liquid product

№	Время удерживания, мин / Retention time, min	Компонент / Component	Масса, % / Mass fraction, %	Объем, % / Volume fraction, %	Количество вещества, % / Mole fraction, %
1	26,938	3,4-диметилгексан / 3,4-dimethylhexane	1,129	1,271	1,423
2	33,225	2,4-диметилгексан / 2,4-dimethylhexane	1,470	1,610	1,739
3	36,698	толуол / toluene	10,963	9,952	14,775
4	43,725	3-этилметилциклопентан / 3-ethylmethylcyclopentane	2,486	2,551	2,751
5	46,155	п-октан / n-octane	1,821	2,041	1,980
6	47,703	2,3,5-триметилгексан / 2,3,5-trimethylhexane	5,202	5,310	5,164
7	57,889	этилбензол / ethylbenzene	3,059	2,777	3,578
8	60,378	2,3-диметилгептан / 2,3-dimethylheptane	4,276	4,383	4,236
9	64,893	3-этилгептан / 3-ethylheptane	3,809	4,127	3,688
10	65,944	о-ксилол / o-xylene	3,752	3,567	3,050
11	68,666	нафтены C ₇₋₉ / naphthenes C ₇₋₉	4,059	4,377	3,930
12	71,029	<i>i</i> -бутилциклопентан / isobutylcyclopentane	5,771	5,795	5,726
13	81,974	2,3-диметилоктан / 2,3-dimethyloctane	4,214	4,295	4,060
14	85,460	1,2,4-триметилбензол / 1,2,4-trimethylbenzene	4,188	4,068	3,974
15	86,993	нафтены C ₁₀₋₁₃ / naphthenes C ₁₀₋₁₃	2,710	2,882	2,365
16	97,353	нафтены C ₁₁₋₁₇ / naphthenes C ₁₁₋₁₇	3,245	3,451	2,578
17	98,512	1,2-диметил, 3-этилбензол / 1,2-dimethyl-3-ethylbenzene	2,154	2,037	1,767
18	106,951	арены C ₁₁₋₁₈ / arenes C ₁₁₋₁₈	1,778	1,572	1,510
19	107,919	арены C ₁₂₋₁₅ / arenes C ₁₂₋₁₅	1,239	1,095	0,948

Особый интерес представляют нафтеновые углеводороды (циклоалканы), например,

i-бутилциклопентан (5,77 мас. %) и нафтены с различным числом атомов углерода (C₇-C₁₇),



которые в совокупности формируют около 10 мас. %. Их присутствие свидетельствует о протекании процессов циклизации и частичной ароматизации в ходе термической обработки. В то же время фиксируются и компоненты с более высокой молекулярной массой – полиароматические соединения (арены C_{11} - C_{18} и C_{12} - C_{15}), что указывает на склонность системы к конденсации и образованию более тяжёлых структур.

Совокупность группового и компонентного состава демонстрирует, что полученный жидкий продукт характеризуется сбалансированным сочетанием изопарафинов и аренов, что определяет его потенциал как основы для моторных топлив. Однако присутствие олефинов и полиаренов подчёркивает необходимость дальнейшей доочистки и стабилизации для снижения склонности к смолообразованию и улучшения эксплуатационных свойств.

Результаты фракционирования (рис. 2) подтверждают высокую перспективность жидкого продукта как моторного топлива:

октановое число легкокипящей фракции (до 100°C) составило 93,3 по исследовательскому и 76,8 – по моторному методу. Наибольший вклад в формирование высоких антидетонационных свойств вносит высокая доля изопарафинов (38,1 по исследовательскому методу) и ароматических углеводородов (33,5), что согласуется с ранее выявленным компонентным составом. Существенное присутствие нафтенных (до 15,6) дополнительно стабилизирует характеристики фракции, улучшая её смесеобразующие свойства. В то же время вклад олефинов и кислородсодержащих соединений остаётся минимальным (не более 3,1 пунктов в сумме), что снижает риск нестабильности при хранении.

Таким образом, совокупный анализ подтверждает возможность использования жидкого продукта в качестве альтернативного моторного топлива после проведения дополнительных стадий очистки и стабилизации, направленных на уменьшение содержания реакционноспособных компонентов.

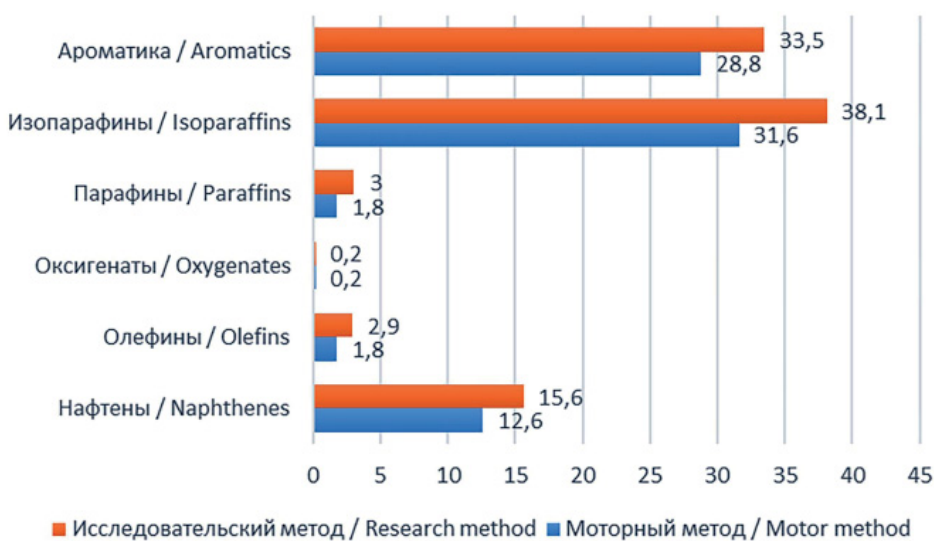


Рис. 2. Октановое число легкой фракции жидкого продукта (цвет онлайн)
Fig. 2. Octane number of the light fraction of the liquid product (color online)

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что жидкий продукт, полученный при термической обработке органо-минерального осадка, характеризуется сложным многофазным составом и широким диапазоном выкипания (72 – 370°C), охватывающим бензиновые, керосиновые и частично дизельные фракции. Основная масса углеводородов

сосредоточена в интервале 100 – 200°C , что свидетельствует о его топливном потенциале как аналога моторных бензинов.

Групповой анализ выявил преобладание изопарафиновых (32,8 мас. %) и ароматических (25,6 мас. %) углеводородов, обеспечивающих высокие антидетонационные характеристики. Существенное содержание нафтенных (23,4 мас. %) дополнительно улучшает смесеобразующие и эксплуатационные свойства



топлива. Хроматографический анализ лёгкой фракции подтвердил наличие типичных для моторных бензинов компонентов – толуола, этилбензола, о-ксилола, а также изопарафинов с высоким вкладом в октановое число. Фракционирование показало, что лёгкая фракция жидкого продукта обладает октановым числом 93,3 по исследовательскому и 76,8 по моторному методу, что соответствует требованиям к топливным системам.

В то же время присутствие олефинов (8,5 мас. %) и кислородсодержащих соединений (4,5 мас. %) указывает на склонность к химической нестабильности и необходимость проведения дополнительных стадий доочистки или гидрообработки.

Таким образом, полученный жидкий продукт осадка может рассматриваться как перспективное сырьё для производства моторных топлив. Его практическое применение требует внедрения методов каталитической доработки, направленных на снижение содержания реакционноспособных соединений и стабилизацию эксплуатационных характеристик.

Список литературы

- Haghighat M., Majidian N., Hallajisani A., Samipour-giri M. Producing of bio-oil from sewage sludge: A review of thermal and catalytic conversion methods // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 250. P. 119–170. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100870>
- Smith J., Wang L., Jones P. Fractional composition and catalytic upgrading of liquid pyrolysis products from sewage sludge // *Fuel Processing Technology*. 2018. Vol. 172. P. 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.070>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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>
- Кузьмина Р. И., Ромаденкина С. Б., Михель А. А., Игнатъев С. В. Переработка резиновых отходов методом высокотемпературного пиролиза // *Химия твердого топлива*. 2016. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.7868/S0023117716040083>
- Дурджевич Д., Трстеньяк М., Хуленич И. Выбор технологии термической обработки осадка сточных вод с использованием процесса аналитической иерархии // *Вода*. 2020. № 12. С. 1255–1268. <https://doi.org/10.3390/w12051255>
- Будыкина Т. А. Сушка осадка производственных сточных вод в естественных условиях // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2017. Т. 25, № 2. С. 242–252. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-242-252>
- Яцун А. В., Коновалов Н. П., Ефименко И. С. Жидкие продукты пиролиза отработанных автомобильных шин под воздействием СВЧ // *Химия твердого топлива*. 2013. № 4. С. 60–63. <https://doi.org/10.7868/S0023117713040130>
- Носенко А. А., Половнева С. И. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. Т. 7, № 2. С. 113–121. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121>
- Quantitation methods in gas chromatography. Deerfield, IL : Alltech associates, Inc., 1998. 28 p.

References

- Haghighat M., Majidian N., Hallajisani A., Samipour-giri M. Producing of bio-oil from sewage sludge: A review of thermal and catalytic conversion methods. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 250, pp. 119–170. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100870>
- Smith J., Wang L., Jones P. Fractional composition and catalytic upgrading of liquid pyrolysis products from sewage sludge. *Fuel Processing Technology*, 2018, vol. 172, pp. 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.070>
- 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>
- 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. Kuzmina R. I., Romadenkina S. B., Mikhel A. A., Ignatiev S. V. Processing of rubber waste by high-temperature pyrolysis. *Solid Fuel Chemistry*, 2016, no. 4, pp. 56–60 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0023117716040083>
9. Durdjevic D., Trstenjak M., Hulenec I. Selection of sewage sludge thermal treatment technology using the analytic hierarchy process. *Water-Magazine*, 2020, no. 12, pp. 1255–1265 (in Russian). <https://doi.org/10.3390/w12051255>
10. Budykina T. A. Drying of industrial wastewater sludge under natural conditions. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 242–252 (in Russian). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-242-252>
11. Yatsun A. V., Kononov N. P., Efimenko I. S. Liquid products of waste tire pyrolysis under microwave irradiation. *Solid Fuel Chemistry*, 2013, no. 4, pp. 60–71 (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0023117713040130>
12. Nosenko A. A., Polovneva S. I. Methods and devices for measuring the surface area dispersed materials. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 113–121 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121>
13. *Quantitation methods in gas chromatography*. Deerfield, IL, Alltech associates, Inc., 1998. 28 p.

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