

# Исследование низкотемпературного пиролиза нефтяного сланца: физико-химические свойства и продукты термического разложения

Руслан Салихов<sup>1</sup>, Михаил Петров<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ООО «ТТУ», Санкт-Петербург, РФ; [in-fo.galoter@gmail.com](mailto:in-fo.galoter@gmail.com),  
[petrov2025sp@mail.ru](mailto:petrov2025sp@mail.ru)

\*Корреспонденция: [petrov2025sp@mail.ru](mailto:petrov2025sp@mail.ru)

**Аннотация.** Одной из приоритетных задач прикладной химии и химической технологии является переработка нефтешламов, что способствует снижению выбросов нефтегазовых предприятий и их дальнейшему использованию в качестве ценного вторичного сырья. В данной статье рассматривается исследование процессов пиролиза нефтяного сланца месторождения "Кендерлык", включая анализ его физико-химических свойств и продуктов термического разложения. Проведен детальный элементный анализ и изучен минеральный состав исходного сырья.

В ходе исследования проведены параллельные эксперименты по пиролизу нефтяного сланца, позволившие определить количественные выходы полукокса, пиролизного масла (смолы) и горючего газа. Проанализированы основные характеристики продуктов, такие, как их компонентный состав, теплотворная способность и другие параметры, имеющие важное значение для последующей переработки и использования.

Полученные экспериментальные данные продемонстрировали стабильные показатели выхода продуктов и подтверждают возможность эффективного использования пиролиза в переработке нефтяного сланца. Выделенные продукты обладают высоким энергетическим потенциалом и могут применяться в различных отраслях промышленности, включая топливно-энергетический сектор и металлургию. Таким образом, переработка нефтяного сланца методом пиролиза представляется перспективным направлением в сфере ресурсосбережения и охраны окружающей среды.

**Ключевые слова:** пиролизная переработка, безотходное производство, утилизация отходов, нефтешлам, пиролизное масло, полукокс.

**Цитирование:** Салихов, Р., Петров, М. (2025). Исследование низкотемпературного пиролиза нефтяного сланца: физико-химические свойства и продукты термического разложения. Вестник ЕНУ имени Л.Н. Гумилева. Серия: Химия. География. Экология, 150(1), 52-65.  
<https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-150-1-52-65>

Академический редактор:  
Э.Е. Копишев

Поступила: 12.02.2025  
Исправлена: 28.02.2025  
Принята: 10.03.2025  
Опубликована: 31.03.2025



**Copyright:** ©2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 1. Введение

Топливо-энергетические ресурсы составляют основу экономики Казахстана, среди которых ключевыми являются нефть, уголь и газ. На сегодняшний день государственным балансом в Казахстане учтено 987 месторождений твердых полезных

ископаемых, 355 месторождений углеводородов, 3 666 месторождений общераспространенных полезных ископаемых и порядка 4 540 месторождений подземных вод (Ақбағова, 2024). Казахстан входит в десятку мировых лидеров по подтвержденным запасам угля, которые составляют около 2,4% от общемировых.

В структуре запасов преобладает бурый уголь (две трети), а оставшаяся треть приходится на каменный уголь (Ramazanova et al., 2019). В настоящее время потребление нефтяных ресурсов, не возобновляемых запасов ископаемого топлива постоянно растут, в то время как их запасы уменьшаются, что приводит к серьезным экологическим проблемам. Вместе с тем, темпы роста мировой экономики привели к увеличению спроса на углеводородные энергоресурсы, что повлияло на развитие альтернативных нефтяных источников энергии. Что касается запасов нефтяного сланца, Министерство промышленности и строительства Республики Казахстан сообщило об утверждении запасов сланцевой нефти на Карагансайском участке, расположенном в Карагандинской и Кызылординской областях. Геологические запасы нефти на этом участке составляют 56,4 млн тонн (Ishekenova, 2025).

Уголь и нефтяной сланец являются важными горючими ископаемыми, широко применяемыми в энергетике и промышленности. Уголь используется в производстве металлургического кокса, углеродных материалов, смол и гуминовых кислот, а также служит сырьем для химической промышленности, где из него получают бензол, толуол, ксилол и другие соединения (Safarov et al., 2019, Bhatt et al., 2021). Нефтяной сланец, содержащий кероген, при термической переработке (пиролизе) дает сланцевое масло и газ, которые могут быть преобразованы в жидкие и газообразные углеводороды, включая бензин, парафин и дизельное топливо (Reyes-Rivera et al., 2020, Dhyani et al., 2018).

Для эффективного использования углеродных ресурсов важно учитывать их органическую структуру. Уголь представляет собой сложный полимер с высокой степенью сшивки, содержащий ароматические и алифатические компоненты. Его свойства и промышленное применение зависят от степени метаморфизма (Taboada-Ruiz et al., 2024).

В отличие от угля, нефтяной сланец содержит органическую матрицу, в основе которой лежит кероген. Его взаимодействие с теплоносителями, такими, как водяной пар, способствует повышению эффективности выделения жидких и газообразных продуктов (Veses et al., 2020; Devi et al., 2014; Pyl et al., 2012).

Среди методов термической переработки углеродсодержащего сырья пиролиз считается одним из наиболее перспективных и широко изучаемых процессов. Для пиролиза используется мелкофракционное сырье, что при смешении с твердым теплоносителем обуславливает нагрев сырья до температуры пиролиза за доли секунды. Он применяется для переработки низкосортных углей, нефтешламов, нефтяного сланца и других углеводородных материалов (Chandran et al., 2020). Пиролиз является основой таких технологий, как сжигание, гидрогенизация, карбонизация и газификация, которые проводятся в замкнутых системах в инертной, восстановительной или окислительной атмосфере при различных температурах и давлениях (Sikhimbayeva et al., 2021).

Высокоскоростной пиролиз позволяет получать относительно большой выход наиболее ценных фракций пиролизного масла - средних и легких, пригодных для производства моторного топлива.

Контролируемый пиролиз угля и нефтяного сланца позволяет получать продукты с улучшенными характеристиками. Оптимальный температурный режим для пиролиза нефтяного сланца составляет 500–550°C, что обеспечивает максимальный выход жидких углеводородов (Sogum et al., 2021).

Среди наиболее ценных продуктов пиролиза угля и нефтяного сланца можно выделить каменноугольную смолу, сланцевое масло и газ. Эти вещества востребованы в химической промышленности для производства олефинов, ароматических соединений и других

высокоценных продуктов (Sieradzka et al., 2020; Toshmamatov et al., 2021; Marculescu et al., 2007).

На кафедре химии ЕНУ им. Л.Н. Гумилева в течение последних лет ведутся научные работы по разработке и внедрения принципиально новых, энергетически и экономически эффективных, экологически безопасных и производительных технологий утилизации низкокачественного топлива, бытовых и промышленных отходов. Основная цель - провести комплексный технико-экономический анализ переработки ТБО по технологии быстрого пиролиза с использованием твердых теплоносителей. В задачи данных исследований входит:

1. Оценить техническую возможность и экономическую целесообразность установок быстрого пиролиза с производительностью 150 000 тонн/год и 1 000 000 тонн/год для переработки сухих ТБО.

2. Оценить потенциал получения ценных продуктов, включая синтетическую нефть, газ, тепловую и электрическую энергию, строительные материалы и ферросплавы в процессе пиролиза.

3. Изучить возможность адаптации данной технологии, первоначально разработанной для переработки сланца, к различным видам низкопотенциального сырья, включая ТБО, бурый уголь и промышленные отходы. (Glazyrin et al., 2024; Nurgaliyev et al., 2024).

В основе предлагаемой технологии лежит метод быстрого пиролиза, разработанный специалистами Энергетического института имени Г.М. Кржижановского (Москва, Россия) в 1940-х годах. Этот метод заключается в термическом разложении тонкоизмельченного сырья в непрерывном бескислородном процессе с использованием в качестве теплоносителя собственной золы. При этом образуется парогазовая смесь и углеродисто-гнездовой остаток (полукокс). Этот универсальный метод подходит для переработки различных видов низкопотенциального сырья, включая горючие сланцы, бурый уголь, фильтровальные кеки и ТБО.

Технология была успешно внедрена на нескольких заводах по переработке сланца в Балтийском регионе. В качестве примера можно привести химический завод в Кивиыли (Эстония) с двумя установками УТТ-500, «Масляный завод» на территории Эстонской электростанции с двумя установками УТТ-3000 и VKG AS в Кохтла-Ярве (Эстония) с тремя установками УТТ-3000. Общая производительность этих установок УТТ превышает 5,3 млн тонн в год, а срок эксплуатации составляет от 6-12 лет (Кохтла-Ярве) до 40 лет («Нефтезавод»).

Многолетнее промышленное применение этой технологии при переработке сланца демонстрирует ее надежность и эффективность, что делает ее перспективным кандидатом для переработки ТБО. Исследования, проводимые в ЕНУ, направлены на адаптацию и оптимизацию этой проверенной технологии для решения задач, характерных для переработки ТБО, что может дать значительные преимущества в плане рекуперации энергии и воздействия на окружающую среду по сравнению с традиционными отходами. (Sabitov et al., 2024).

Контролируемый процесс пиролиза горючего сланца позволяет получать продукты более высокого качества. Важную роль играют температурные условия: оптимальный температурный диапазон для пиролиза составляет от 500 до 550°C, что обеспечивает высокий выход горючего сланца. Исследования также указывают на важность выбора теплоносителя для пиролиза горючего сланца. Например, использование водяного пара при конвективном нагревании горючего сланца повышает эффективность и качество получаемых продуктов. Это происходит из-за химического взаимодействия высокотемпературного водяного пара с керогеном, которое изменяет характеристики добычи нефти и газа (Nurgaliyev et al., 2024; Nurgaliyev et al., 2024; Nurgaliyev et al., 2024).

В рамках научного проекта проводится исследование процессов пиролиза нефтяного сланца месторождения Кендерлык (Казахстан) с определением физико-химических свойств и продуктов термического разложения. Проведен анализ различных параметров пиролиза,

таких, как температура, время обработки и состав исходного сырья. Особое внимание уделено изучению влияния этих параметров на выход и состав продуктов, включая углеводороды, газообразные продукты и твердые остатки. Для достижения поставленных целей планируется использовать методы термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), что позволит получить точные данные о кинетике процессов разложения.

Ожидается, что результаты исследования помогут не только в понимании механизмов пиролиза нефтяного сланца, но и в разработке более эффективных технологий переработки, что имеет важное значение для энергетической безопасности и устойчивого развития региона. Кроме того, полученные данные могут быть использованы для оценки экономической целесообразности использования нефтяного сланца как альтернативного источника углеводородов.

## **2. Материалы и методы**

Существующие методы анализа органосодержащего сырья, такие, например, как метод Фишера, позволяют определять общую картину процесса пиролиза исходного сырья, но не соответствуют промышленным процессам и технологиям в части скорости и оптимальной температуры пиролиза конкретного сырья. В результате выходы и состав получаемых при пиролизе продуктов не соответствует выходу и составу продуктов, получаемых по промышленным технологиям.

Стенд высокоскоростного пиролиза органического сырья имитирует промышленную технологию переработки органического сырья, базирующуюся на методе «Галотер» - технологии перегонки горючего органического сырья надземным способом, классифицируемой как технология горячей переработки твердых частиц. В процессе термического разложения используется горизонтальная цилиндрическая реторта типа вращающейся печи, которая слегка наклонена.

Сущность метода заключается в том, что исходное сырье в непрерывном процессе смешивается с теплоносителем – собственной горячей золой – теплоносителем, нагреваемой за счет потенциального тепла получаемого в результате пиролиза полукокса. Для пиролиза используется мелкофракционное сырье, что при смешении с твердым теплоносителем обуславливает нагрев сырья до температуры пиролиза за доли секунды. Высокоскоростной пиролиз позволяет получать относительно большой выход наиболее ценных фракций пиролизного масла - средних и легких, пригодных для производства моторного топлива.

Для анализа исходных образцов нефтяного сланца были подготовлены аналитические пробы. Для оценки химического состава угольной золы подготовлен образец массой 10 граммов.

Измельченный нефтяной сланец смешивали с измельченным твердым органическим компонентом, температура максимальной скорости разложения которого отличалась от температуры максимальной скорости разложения органического вещества нефтяного сланца не более чем на 5°C. Пиролизные процессы угля и нефтяного сланца проводили при 520°C в течение 80 минут согласно температурному режиму, приведенному в Таблице 1.

В ходе эксперимента суспензию древесного угля (50 г) нагревали в алюминиевой реторте, а продукты разложения направлялись в приемник, охлаждаемый ледяной водой, где происходила конденсация смолы и воды. Газообразные продукты после отбора проб для анализа выпускались в атмосферу. Определение компонентного состава газа, полученного в результате пиролиза угля, проводилось на хроматографе ЛХМ-8 МД.

Полученную из парогазовой смеси пиролизную смолу подвергали перегонке, в результате которой выделялись бензиновая и дизельная фракции, а также остаток с температурой кипения выше 350°C. Этот остаток смешивали с жидким продуктом нефтяного происхождения с температурой кипения выше 350°C, содержащим эмульгатор - асфальтены и 2–6,5% органических соединений серы на элементарную серу. В полученной смеси

эмульгировали водный раствор прекурсора катализатора, из которого при смешении с водородом и нагреве в условиях гидроконверсии формировался дисперсный сульфидный катализатор гидроконверсии.

После гидроконверсии жидкий продукт подвергали перегонке. Бензиновая фракция гидроконверсии объединялась с бензиновой фракцией, полученной при перегонке пиролизной смолы, а дизельная фракция гидроконверсии - с дизельной фракцией, выделенной при перегонке пиролизной смолы.

Элементный анализ твердых и жидких проб проводили на универсальном анализаторе Multi EA® 5100 (Analytik Jena, Германия). Этот прибор позволяет определять содержание серы, хлора, азота и углерода в жидких, твердых, пастообразных и газообразных образцах нефти, нефтепродуктов и других органических матриц. Масса пробы не превышала 10 мг. Твердые образцы измельчали в шаровой мельнице до размера частиц <100 мкм. Жидкие образцы гомогенизировали встряхиванием в течение 5 минут.

Калибровка прибора проводилась с использованием сертифицированных стандартных образцов (СО) для каждого определяемого элемента. Калибровочные кривые были построены в диапазоне концентраций 0,001% - 10% для серы, азота и хлора и 0,1% - 50% для углерода. Контроль качества обеспечивался ежедневным анализом контрольных образцов. Относительное стандартное отклонение результатов не превышало 2 % для всех определяемых элементов.

Все измерения проводились в трех экземплярах. Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы OriginPro 2022 (OriginLab Corporation, США).

**Таблица 1.** Режим нагрева угольной суспензии и суспензии нефтяного сланца

Время нагрева, мин	Температура, °С
10	220
20	310
30	380
40	440
50	480
60	505
70	520
80	520

### 3. Результаты

#### 3.1. Характеристика сырья

Результаты анализа исходного угля представлены в Таблице 2.

**Таблица 2.** Характеристика сырья

Компоненты	Условное обозначение	Показатели по массе, %		
		Аналитическая	Сухой	Горючий
Влага	W	0,5		
Зола	A	52,24	52,50	
Сера	S	1,00	1,00	2,11
Углерод	C	22,79	22,90	48,21
Водород	H	2,29	2,30	4,84
Азот	N	0,50	0,50	1,05
Кислород	O	20,70	20,80	43,79
Теплотворная способность:	Q <sub>l</sub>	1929,7 ккал/кг		
Нижняя теплота сгорания	Q <sub>h</sub>	2030,4 ккал/кг		

Анализ массовой доли хлора и мышьяка показал следующие значения: Cl – 0,058%, As – 0,0039%. Полученные показатели соответствуют "следам" и далее не учитываются.

### 3.2. Характеристика золы горючих сланцев

Химический состав минеральной части горючих сланцев представлен в Таблице 3.

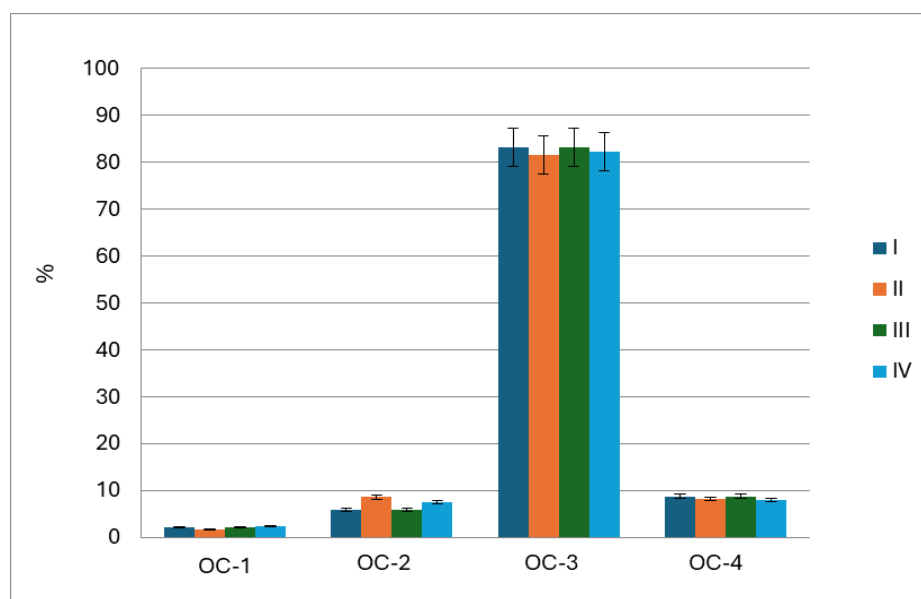
**Таблица 3.** Химический состав минеральной части горючих сланцев (ОС - образец сланца)

№	Вещество	Содержание, %			
		ОС-1	ОС-2	ОС-3	ОС-4
1	SiO <sub>2</sub>	57,2	54,3	60,3	58,8
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,2	10,8	9,4	9,7
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,4	5,9	6,8	6,4
4	CaO	4,6	4,9	6,8	5,7
5	MgO	3,2	3,4	1,5	2,8
6	S	2,8	2,5	1,6	1,9
7	K <sub>2</sub> O	1,3	2,2	1,6	1,4
8	TiO <sub>2</sub>	2,6	3,5	2,9	2,4

Из всех представленных образцов ОС-4 представляет собой сбалансированный состав с умеренным содержанием всех компонентов без резких отклонений. Наибольшее содержание SiO<sub>2</sub> в образце 3 указывает на верхнюю долю кварцевых минералов, что делает этот образец более устойчивым к термическому воздействию. Кварц (основной компонент кремнезема) придает материалу термическую и механическую устойчивость, что делает этот образец более устойчивым к термическому разложению в процессе пиролиза или других методов термической обработки. В образцах 1 и 2 содержание серы и железа выше в сравнении с другими ОС, что может способствовать большему загрязнению выбросов, но также может иметь значение в химико-технологических процессах, где важны каталитические свойства железа.

### 3.3. Результаты балансовых экспериментов

В ходе исследования были проведены 4 балансовых эксперимента по пиролизу горючих сланцев, результаты которых представлены в Рисунке 1.



**Рисунок 1.** Выход продуктов пиролиза

Образцы отличаются высоким выходом масла и низкой влажностью, что делает их перспективным для переработки в жидкие углеводороды и использования в качестве энергетического сырья. Выход полукокса (83,2%) и потери газа (8,7%) связаны с высокой минерализацией и низким содержанием летучих углеводородов.

### 3.4. Характеристика продуктов пиролиза

Продукты пиролиза горючих сланцев — это газ, смола с подсточной водой и полукокс. Для исследования состава продуктов пиролиза было необходимо накопить около 50 г смолы с подсточной водой и собрать достаточное количество газа. Поэтому был проведен один эксперимент на увеличенной реторте с загрузкой 1 кг топлива для накопления смолы. Однако все расчеты и балансы приведены на основе усредненных результатов 4 экспериментов пиролиза.

Дополнительные параметры исследований включали: контроль температуры в реторте для определения оптимального режима, анализ состава газов, химический анализ смолы с определением ключевых компонентов, таких, как предельные углеводороды, азот, угарный и углекислый газы и серосодержащие соединения, а также оценку выхода и характеристики пиролизного газа, пиролизного масла и полукокса, включая его калорийность и структурные изменения после пиролиза.

#### 3.4.1. Характеристика пиролизного газа

Пирогаз был отобран при двух разных температурах: 480°C и 520°C, соответствующих началу выделения газа и периоду максимального выделения газа для наиболее точного расчета его теплотворной способности. Таблица 4 показывает результаты анализа компонентного состава, полученного пиролизного газа, % (об.).

**Таблица 4.** Состав пиролизного газа

Компонент	Формула	Образец			
		ОС-1	ОС-2	ОС-3	ОС-4
Метан	CH <sub>4</sub>	1,11	0,34	0,12	2,01
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,33	0,41	0,14	2,41
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,38	0,43	0,15	2,51
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,55	0,17	0,06	1,00
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,15	0,05	0,02	0,27
Этен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,52	0,47	0,16	2,75
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,65	0,51	0,18	2,99
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1,11	0,35	0,12	2,01
Водород	H <sub>2</sub>	1,00	3,26	7,42	0,12
Окись углерода	CO	44,64	43,40	0,50	0,50
Азот	N <sub>2</sub>	1,10	1,30	2,40	1,20
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	41,48	46,44	86,93	80,32
Сероводород	H <sub>2</sub> S	2,98	2,87	1,81	1,91
Нижняя теплота сгорания	кДж/кг	12 706,85	7 992,83	1 608,22	12 676,69
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1,58	1,56	1,79	1,90
Воздух для сгорания	м <sup>3</sup>	3,07	1,87	0,51	3,36

Теплотворная способность газа была рассчитана с использованием эмпирической формулы Д.И. Менделеева. Для определения удельной теплоты сгорания твердых и жидких топлив наиболее простой является формула Д.И. Менделеева с эмпирическими коэффициентами для горючих элементов, кДж/кг:

$$Q_{н}^p = 339 C^p + 103 H^p - 109 (O^p - S^p) - 25W^p, \quad (1)$$

где С, Н, S, О и W - содержание элементов и влаги в процентах.

Среднее значение низшей теплотворной способности газа составило 7731,95 ккал/кг. Этот высококалорийный газ был получен в основном за счет высоких концентраций метана и этана. Рассчитанная плотность газа на основе усредненных данных составила 1,13 кг/м<sup>3</sup>.

Наивысшая теплотворная способность пиролизного газа значительно превышает показатели исходного сырья: для газа - 12 706,85 кДж/кг, тогда как у исходного сырья этот показатель составляет 8 493,86 кДж/кг. Даже при минимальных значениях теплотворная способность масла и газа остается существенно выше, чем у исходного сырья и полукокса.

Представленные данные подтверждают превосходство энергетического потенциала пиролизных продуктов, особенно масла и газа, по сравнению с исходным сырьем и образующимся полукоксом.

#### 3.4.2. Характеристика пиролизного масла

Масло представляет собой темную вязкую жидкость, легче воды, с характерным запахом. Масло, собранное из четырех экспериментов, было отделено от воды. В таблице 5 приведены результаты элементного анализа пиролизного масла.



**Таблица 5.** Элементный анализ пиролизного масла.

№	Образец	Состав						
		С, %	Н, %	N, %	О, %	S, %	Теплота сгорания, кДж/кг	Теплота сгорания, ккал/кг
I	ОС-1	84,6	10,5	0,9	1,8	2,2	41921,9	10014,6
II	ОС-2	85,3	9,8	0,6	2,3	2,0	41203,9	9843,1
III	ОС-3	79,4	9,1	0,3	9,7	1,5	37463,9	8949,6
IV	ОС-4	82,5	9,6	0,5	5,7	1,7	39600,4	9460,0

Как видно из полученных данных, масло содержит большое количество углерода с низким содержанием серы, что повышает его калориметрическую ценность.

**Таблица 6.** Физико-химические параметры пиролизного масла

Образец		25°C - 200°C, %	200°C-360°C, %	>360°C, %	ρ, кг/м <sup>3</sup>	Температура сгорания, °C
I	ОС-1	4,6	26,7	68,7	896	308
II	ОС-2	3,4	25,4	71,2	891	301
III	ОС-3	2,1	20,1	77,8	909	327
IV	ОС-4	2,9	22,5	74,6	903	315

Физико-химические параметры масла: плотность (кг/м<sup>3</sup>) - 0,83; температура вспышки в открытом тигле - 313°C; температура застывания - 6°C. Образец ОС-1 имеет наибольшее содержание легколетучих фракций (4,6%), что указывает на более высокую испаряемость и легкость. ОС-3 имеет наименьшее количество летучих компонентов (2,1%), что делает его менее пожароопасным и более стабильным при хранении, так как он снижает возможности образования взрывоопасных паров в замкнутых пространствах. Это особенно важно при длительном хранении.

#### 3.4.3. Характеристика полукокса

Характеристики полукокса, полученного в результате пиролиза угля, представлены в Таблице 7.

**Таблица 7.** Элементный анализ полукокса

№	Образец	Полукокс						
		С, %	Н, %	N, %	О, %	S, %	Теплота сгорания, кДж/кг	Теплота сгорания, ккал/кг
I	ОС-1	14,4	1,1	0,4	10,6	0,7	5192,1	1240,3
II	ОС-2	15,6	0,8	0,3	9,6	0,5	5302,3	1266,7
III	ОС-3	8,9	0,5	0,2	5,5	0,2	3069,4	733,2
IV	ОС-4	10,9	0,6	0,2	6,2	0,4	3817,8	912,0

Данные таблицы показывают наибольшее содержание углерода, особенно в образцах 1 и 2 (14,4% и 15,6%), что свидетельствует об их более высокой теплоте сгорания (1240,3 и

1266,7 ккал/кг соответственно). Это указывает на высокий энергетический потенциал данных образцов при использовании их в качестве твердого топлива. Содержание водорода во всех образцах находится на низком уровне (0,5–1,1%), что типично для углеродных остатков после термической обработки. Содержание кислорода значительно варьируется, с максимальными значениями в ОС-1 (10,6%) и ОС-2 (9,6%), а минимальными – в ОС-3 (5,5%). Высокий уровень кислорода может указывать на присутствие кислородсодержащих соединений, что влияет на химические свойства полукокса. Низкое содержание серы во всех образцах указывает на экологическую безопасность их применения с точки зрения выбросов сернистых соединений.

#### 4. Обсуждение

Химический состав минеральной части горючих сланцев месторождения "Кендерлык" представляет собой сбалансированный состав с умеренным содержанием всех компонентов. Различные образцы горючего сланца имеют свои преимущества в зависимости от целей их дальнейшей переработки, будь то энергетическое использование, производство строительных материалов или химическая переработка. Высокое содержание диоксида кремния может свидетельствовать о значительном содержании глинистых и песчаных частиц. Содержание  $Al_2O_3$  свидетельствует о глинистом составе и может повлиять на огнеупорные свойства сланцев, а также привести к различным условиям формирования сланцевых отложений. Наличие оксида железа (III) и серы указывает на возможное присутствие пирита или сидерита. Значения  $K_2O$  и  $TiO_2$  может свидетельствовать о примесях слюд и тяжелых минералов.

Проведенное исследование процесса низкотемпературного пиролиза горючих сланцев месторождения "Кендерлык" показало, что основными продуктами пиролиза являются полукокс (81,95%), горючий газ (8,2%) и пиролизное масло (7,9%).

Углерод является основным компонентом, определяющим энергетическую ценность полукокса. Содержание водорода и кислорода в этих образцах также превалирует, что также способствует увеличению количества энергии на единицу массы. В остальных сериях содержание представлено ниже, что также отражается на их теплотворных способностях. Низкое содержание азота указывает на наличие примесей белковых соединений или измеренных азотсодержащих веществ.

В полученном пиролизном газе в наибольших количествах присутствуют  $CH_4$  (44,96%),  $CO_2$  (16,27%),  $CO$  (12,16%) и  $C_2H_6$  (9,74%). Остальные компоненты составляют менее 4% газа.

Полученное пиролизное масло характеризуется низким выходом летучих веществ и высокой теплотворной способностью ( $Q = 9567,18$  ккал/кг). Это свидетельствует о том, что процесс пиролиза эффективно концентрирует энергию в продуктах переработки, превращая их в высокоэффективные источники энергии и в дальнейшем могут быть использованы как эффективное бездымное топливо и восстановитель в металлургической промышленности. Таким образом, ценные химические продукты, полученные из горючего сланца, могут быть эффективно использованы в области энергетики и химической промышленности.

#### 5. Заключение

В настоящее время среди существующих методов термпереработки органических веществ пиролиз является наиболее перспективным и исследуемым термическим направлением переработки таких отходов, как низкосортные угли, нефтешламы, битумы и др. (Shandarin, 2016). Процесс быстрого пиролиза эффективно преобразует отходы в ценные продукты, такие, как синтетическое масло, газ, тепло- и электроэнергия, строительные материалы и ферросплавы, что способствует ресурсосбережению и энергетическому производству. Успешная адаптация этой технологии, разработанной для переработки горючих сланцев, подтверждает ее надежность и эффективность. Технология полностью

безотходна - все продукты пиролиза либо представляют коммерческую ценность (жидкое топливо, электро- и теплоэнергия, зола), либо используются в технологическом процессе (пиролизный газ, избыточное тепло). Образующаяся зола инертна и может применяться для производства строительных материалов, асфальта, удобрений, а также при плавке - для получения ферросплавов и карбида кальция.

В исследовании для пиролиза использовалось мелкофракционное сырье, что при смешении с твердым теплоносителем обуславливает нагрев сырья до температуры пиролиза за доли секунды. Высокоскоростной пиролиз позволяет получать относительно большой выход наиболее ценных фракций пиролизного масла - средних и легких, пригодных для дальнейшего использования. Экспериментальные данные показали эффективный выход продуктов, что подтверждает возможность использования пиролиза в переработке нефтяного сланца.

Преимущества переработки нефтяного сланца включают экономическую эффективность за счет использования местных ресурсов, снижения экологических рисков и повышения энергетической безопасности. Продукты процесса горения сланцев обладают высоким энергетическим потенциалом и могут применяться в различных отраслях промышленности, включая топливно-энергетический сектор и металлургию.

**6. Вспомогательный материал:** нет вспомогательного материала.

#### 7. Вклад авторов.

Концептуализация, Р.С. и М.П.; методология, Р.С.; формальный анализ, Р.С.; исследование, Р.С. и М.П.; написание - подготовка оригинального черновика, М.П.; написание - рецензирование и редактирование, М.П.; руководство, Р.С. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

#### 8. Информация об авторах:

Салихов Руслан Минуллаевич – научный сотрудник, ООО «ТТУ», ул. Будапештская, д. 97, корп. 2 литер А, помещ. 9-Н, комната 33, Санкт-Петербург, РФ, 192283; [info.galoter@gmail.com](mailto:info.galoter@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0005-3374-676X>

Петров Михаил Сергеевич - научный сотрудник, ООО «ТТУ», ул. Будапештская, д. 97, корп. 2 литер А, помещ. 9-Н, комната 33, Санкт-Петербург, РФ, 192283; [petrov2025sp@mail.ru](mailto:petrov2025sp@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0007-9121-7561>

**9. Финансирование:** Данное исследование было поддержано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR21882171).

**10. Благодарности:** нет.

**11. Конфликты интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### 12. Список литературы

1. Akbarova, E. (2024). Doklad Predsedatelya Komiteta geologii Ministerstva promyshlennosti I stroitel'stva RK. *Elektron. Resur.* <https://www.gov.kz/memleket/entities/geology/press/news/details/902112?directionId=3783&lang=ru>
2. Bhatt, M., Chakinala, A. G., Joshi, J. B., Sharma, A., Pant, K. K., Shah, K., & Sharma A. (2021). Valorization of solid waste using advanced thermo-chemical process: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105434>

3. Chandran, R., Kaliaperumal, R., Balakrishnan, S., Britten, A. J., MacInnis, J., & Mkandawire, M. (2020). Characteristics of bio-oil from continuous fast pyrolysis of *Prosopis juliflora*. *Energy*, 190, 116387. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116387>
4. Devi, P., & Saroha, A.K. (2014). Risk analysis of pyrolyzed biochar made from paper mill effluent treatment plant sludge for bioavailability and eco-toxicity of heavy metals. *Bioresource Technology*, 162, 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.093>
5. Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*, 129, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
6. Glazyrin, S. A., Aibuldinov, Y. K., Kopishev, E. E., Zhumagulov, M. G., & Bimurzina, Z. A. (2024). Analysis of the Composition and Properties of Municipal Solid Waste from Various Cities in Kazakhstan. *Energies*, 17(24), 6426. <https://doi.org/10.3390/en17246426>
7. Ishekenova, B. (2025). Kazahstane nashli bol'shie zapasy slancevoi nefti: dv kakih regionah ee hotyat dobyvat. *Elektron. Resurs.* <https://lsm.kz/kazahstan-imeet-ser-eznye-zapasy-slancevoj-nefti>
8. Marculescu, C., Antonini, G., Badea, A., & Apostol, T. (2007). Pilot installation for the thermochemical characterisation of solid wastes. *Waste Management*, 27(3), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.02.011>
9. Nurgaliyev, N. U., Aibuldinov, Ye. K., Iskakova, Zh. B., Kolpek, A., Mashan, T. T., Kusepova, L. A., & Kopishev, E. Ye. (2024). Investigation of the kinetics of the coal pyrolysis process. *Vestnik KazUTB*, 2, 280-289. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.23-456>
10. Nurgaliyev, N. U., Iskakova, Zh. B., Kolpek, A., Aibuldinov, Ye. K., Sabitov, A. S., Kopishev, E. Ye., Salihov, R. M., Petrov, M. S., Alzhanova, G. Zh., Abdiyusupov, G. G., & Omirzak, M. T. (2024). Sovmestnyi piroliz nizkosortnogo topliva I prirodnogo bituma. *Vestnik KazUTB*, 2, 215-225. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.23-391>
11. Nurgaliyev, N. U., Iskakova, Zh. B., Kolpek, A., Aibuldinov, Ye. K., Sabitov, A. S., Kopishev, E. Ye., Salihov, R. M., Petrov, M. S., Alzhanova, G. Zh., Abdiyusupov, G. G., & Omirzak, M. T. (2024). Sovmestnyi piroliz nizkosortnogo topliva I prirodnogo bituma. *Vestnik KazUTB*, 2, 215-225. <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.23-391>
12. Nurgaliyev, N., Kolpek, A., Iskakova, Zh., Glazyrin, S., Safarov, R., & Aibuldinov, Ye. (2024). Low-temperature pyrolysis of coal with determination of physicochemical properties of coal and its thermal decomposition products. *E3S Web of Conferences. ICSREE 2024*, 545, 03004
13. Pyl, S. P., Van Geem, K. M., Puimège, P., Sabbe, M. K., Reyniers, M. F., & Marin, G. B. (2012). A comprehensive study of methyl decanoate pyrolysis. *Energy. Elsevier Ltd.*, 43(1), 146–160. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.11.032>
14. Ramazanova, N. Y., Berdenov, Z. G., Ramazanov, S. K., Kazangapova, N. B., Romanova, S. M., Toksanbaeva, S. T., & Wendt, J. (2019). Landscape-geochemical analysis of steppe zone basin Zhaiyk. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Series of Geology and Technical Sciences)*, 436, 33–41. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.95>.
15. Reyes-Rivera, J., Solano, E., Terrazas, T., Soto-Hernández, M., Arias, S., Almanza-Arjona, Y. C., & Polindara-García, L. A. (2020). Classification of lignocellulosic matrix of spines in Cactaceae by Py-GC/MS combined with omic tools and multivariate analysis: A chemotaxonomic approach. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 148, 104796. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104796>
16. Sabitov, A., Lopez, G., Mashan, T. T., Kusepova, L. A., Aibuldinov, Ye. K., & Kopishev, E. E. (2024). Investigation of oil shale pyrolysis process: Physicochemical properties and decomposition products. *E3S Web Conf. 2024 9th International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE 2024)*, 545, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454503002>

17. Safarov, R. Z., Shomanova, Z. K., Mukanova, R. Z., Nossenko, Y. G., Alexandru, I., Sviderskiy, A. K., & Sarova, N. (2019). Design of neural network for forecast analysis of elements-contaminants distribution on studied territories (on example of Pavlodar City, Kazakhstan). *Series Chemistry and Technology* (National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhshtan), 438, 86–98. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1491.78>.
18. Shandarin, V. D. (2016). Bezalternivnyi metod utilizacii uglerodsoderzhashih othodov – Nauchnoe obozrenie. *Tekhnicheskie nauki* (nauchnyi zhurnal), 2, 71–74. <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1082>
19. Sikhimbayeva, D., Zulkharnay, A., Zhakupov, A., Yessilov, A., & Kutybay, M. (2021). Analysis of factors affecting to the development of sub-production industry of the Republic of Kazakhstan. *Montenegrin Journal of Economics*, 17(3), 41–57. <https://doi.org/10.14254/1800-5845/2021.17-3.4>
20. Sieradzka, M., Gao, N., Quan, C., Mlonka-Mędrala, A., & Magdziarz, A. (2020). Biomass thermochemical conversion via pyrolysis with integrated CO<sub>2</sub> capture. *Energies*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/EN13051050>
21. Sorum, L., Gronli, M. G., & Hustad, J. E. (2001). Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes. *Fuel*, 80(9), 1217–1227. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00218-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00218-0)
22. Taboada-Ruiz, L., Pardo, R., Ruiz, B., Díaz-Somoano, M., Calvo, L. F., Paniagua, S., & Fuente, E. (2024). Progress and challenges in valorisation of biomass waste from ornamental trees pruning through pyrolysis processes. Prospects in the bioenergy sector. *Environmental Research*, 249, 118388. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118388>
23. Toshmamatov, B., Davlonov, K., Rakhmatov, O., & Toshboev, A. (2021). Recycling of municipal solid waste using solar energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1030(1), 012165. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012165>
24. Veses, A., Sanahuja-Parejo, O., Callén, M. S., Murillo, R., & García, T. (2020). A combined two-stage process of pyrolysis and catalytic cracking of municipal solid waste for the production of syngas and solid refuse-derived fuels. *Waste Management*, 101, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.009>

## Сланецтің төмен температуралық пиролизін зерттеу: физика-химиялық қасиеттері және термиялық ыдырау өнімдері

Руслан Салихов, Михаил Петров

**Аңдатпа.** Қолданбалы химия мен химиялық технологияның басым міндеттерінің бірі мұнай-газ кәсіпорындарының шығарындыларын азайтуға және оларды одан әрі бағалы екіншілік шикізат ретінде пайдалануға көмектесетін мұнай шламын өңдеу болып табылады. Бұл мақалада Кендірлік кен орнындағы мұнай тақтатастарының пиролиз процестерін зерттеу, оның ішінде физикалық-химиялық қасиеттері мен термиялық ыдырау өнімдерін талдау қарастырылған. Толық элементтік талдау жүргізіліп, шикізаттың минералдық құрамы зерттелді.

Зерттеу барысында жартылай кокстың, пиролиздік майдың (шайырдың) және жанғыш газдың сандық шығымдылығын анықтауға мүмкіндік беретін тақтатастардың пиролизі бойынша параллель тәжірибелер жүргізілді. Өнімдердің компоненттік құрамы, калориялық құндылығы және кейіннен өңдеу және пайдалану үшін маңызды басқа параметрлері сияқты негізгі сипаттамалары талданды.

Алынған тәжірибелік мәліметтер тұрақты өнім шығымдылығын көрсетті және тақтатасты өңдеуде пиролизді тиімді пайдалану мүмкіндігін растады. Оқшауланған өнімдер жоғары энергетикалық әлеуетке ие және әртүрлі салаларда, соның ішінде отын-энергетика

секторында және металлургияда қолданылуы мүмкін. Осылайша, мұнай тақтатастарын пиролиз әдісімен өңдеу ресурстарды үнемдеу және қоршаған ортаны қорғау саласындағы перспективті бағыт болып көрінеді.

**Түйін сөздер:** пиролизді өңдеу, қалдықсыз өндіріс, қалдықтарды жою, мұнай шламы, пиролиздік мұнай, жартылай кокс.

## **Study of low-temperature pyrolysis of oil shale: physico-chemical properties and thermal decomposition products**

**Ruslan Salikhov, Mikhail Petrov**

**Abstract:** One of the priority tasks of applied chemistry and chemical technology is the processing of oil sludge, which contributes to the reduction of emissions of oil and gas enterprises and their further use as valuable secondary raw materials. This paper deals with the study of pyrolysis processes of oil shale from the ‘Kenderlyk’ field, including the analysis of its physical and chemical properties and thermal decomposition products. The detailed elemental analysis was carried out and mineral composition of the feedstock was studied.

During the research, parallel experiments on pyrolysis of oil shale were carried out, which allowed to determine quantitative yields of semi-coke, pyrolysis oil (tar) and combustible gas. The main characteristics of the products, such as their component composition, calorific value and other parameters important for further processing and use were analysed.

The obtained experimental data demonstrated stable product yields and confirm the possibility of effective use of pyrolysis in oil shale processing. The isolated products have high energy potential and can be used in various industries, including fuel and energy sector and metallurgy. Thus, oil shale processing by pyrolysis method seems to be a promising direction in the sphere of resource saving and environmental protection.

**Keywords:** pyrolysis processing, waste-free production, waste utilisation, oil sludge, pyrolysis oil, semi-coke.