

Научная статья

УДК 544.431.2:665.642'17

doi: 10.17223/24135542/38/1

## **Исследование кинетики и механизма реакции процесса пиролиза карбонатного бурового шлама на основе нефти**

**Нургуль Сандибаевна Ержанова<sup>1</sup>, Раиса Ивановна Кузьмина<sup>2</sup>**

*<sup>1, 2</sup> Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

*<sup>1</sup> nurgul.yerzhanova@mail.ru*

*<sup>2</sup> kuzmina@mail.ru*

**Аннотация.** Исследованы физико-химические параметры пиролиза бурового шлама. Пиролиз карбонатного бурового шлама (КБШ) на нефтяной основе изучали с помощью термогравиметрического анализатора и вакуумной трубчатой печи, основной интервал температур реакций составил 350–550°C. Используя данные процесса пиролиза, рассчитаны средние энергии активации четырьмя безмодельными методами. Выявлено, что пиролиз представляет собой многостадийный процесс, состоящий минимум из трех стадий. С помощью метода Фридмана установлено, что начало процесса деструкции КБШ протекает в диффузионной области. Определены значения кинетических параметров Аррениуса в зависимости от остаточной массы образца. Полученные значения параметров использованы в качестве исходных данных для определения кинетической модели методом нелинейной регрессии. Результаты данного исследования дали величины 185,5, 184,16, 166,17 и 176,03 кДж/моль. Механизм реакции пиролиза КБШ предсказан методом Криадо (Z-masterplot). Метод Z-masterplot используется для определения механизма реакции пиролиза сложного сырья, в данной работе – карбонатного бурового шлама на нефтяной основе. Наиболее подходящую модель механизма реакции можно получить, сравнив результаты предполагаемой кинетической модели с экспериментальными данными. Установлено, что высокая скорость нагревания помогает предсказать механизм реакции, но не может быть описана единой моделью реакции. Помимо этого, определен процесс трансформации модели пиролиза КБШ при различных скоростях нагрева. Установлено, что механизм реакции КБШ очень сложен при более низких скоростях нагрева. Анализ кинетики и механизма реакции пиролиза бурового шлама требуется для оптимизации параметров процесса, а также для повышения выхода извлеченного минерального масла. Данное исследование может улучшить эффект использования ресурсов пиролиза КБШ, который имеет большое значение для экологически безопасной разработки газоконденсатного производства.

**Ключевые слова:** буровой шлам, пиролиз, кинетика, механизм реакции, энергия активации

**Для цитирования:** Ержанова Н.С., Кузьмина Р.И. Исследование кинетики и механизма реакции процесса пиролиза карбонатного бурового шлама на основе нефти // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 38. С. 6–16. doi: 10.17223/24135542/38/1

Original article

doi: 10.17223/24135542/38/1

## **Research of the kinetic and reaction mechanism of the pyrolysis process of oil-based carbonate drill sludge**

**Nurgul S. Yerzhanova<sup>1</sup>, Raisa I. Kuzmina<sup>2</sup>**

*<sup>1, 2</sup> Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation*

*<sup>1</sup> nurgul.yerzhanova@mail.ru*

*<sup>2</sup> kuzmina@mail.ru*

**Abstract.** This article studies the physicochemical parameters of drill cuttings pyrolysis. The pyrolysis of petroleum-based carbonate drill cuttings (CDC) was studied using a thermogravimetric analyzer and a vacuum tube furnace, and the main reaction temperature range is 350-550°C. Using data from the pyrolysis process, the average activation energies were calculated using four model-free methods. Using model-free analysis methods, it was revealed that pyrolysis is a multi-stage process that consists of at least three stages. Using the Friedman method, it was established that the beginning of the process of destruction of CDC occurs in the diffusion region. The values of the Arrhenius kinetic parameters were determined depending on the residual mass of the sample. The obtained parameter values were used as initial data to determine the kinetic model using the nonlinear regression method. The results of this study were 185,5 kJ/mol, 184,16 kJ/mol, 166,17 kJ/mol and 176,03 kJ/mol. The reaction mechanism of CDC pyrolysis was predicted by the Criado method (Z-masterplot). The Z-masterplot method is used to determine the reaction mechanism of the complex feedstock in this work, oil-based carbonate drill cuttings. The most appropriate model of the reaction mechanism can be obtained by comparing the results of the proposed kinetic model with experimental data. It has been found that high heating rates help predict the reaction mechanism, but cannot be described by a single reaction model. The process of transformation of the CDC pyrolysis model at different heating rates was also determined. It has been established that the reaction mechanism of CDC is very complex at lower heating rates.

**Keywords:** drill sludge, pyrolysis, kinetic, reaction mechanism, activation energy

**For citation:** Yerzhanova, N.S., Kuzmina, R.I. Research of the kinetic and reaction mechanism of the pyrolysis process of oil-based carbonate drill sludge. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 38, 6–16. doi: 10.17223/24135542/38/1

### **Введение**

Существует множество методов обработки и использования ресурсов карбонатного бурового шлама (КБШ), включая компостирование, микроволновое нагревание, экстракцию растворителем и пиролиз [1]. Однако из-за низкой эффективности переработки, сложности процесса, высокой стоимости, низкой нефтеотдачи и возможности вторичного загрязнения он не получил коммерческого развития. Пиролизная обработка карбонатного бурового шлама имеет преимущества значительной безвредности, высокого использования

ресурсов, меньшего загрязнения воздуха и стабильной работы [2, 3]. Однако исследований кинетических параметров и механизма реакции КБШ мало.

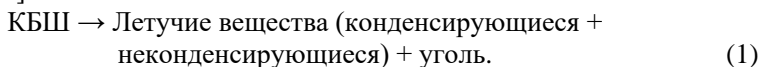
Оценка кинетических параметров и механизма реакции пиролиза имеет решающее значение для оптимизации параметров процесса, расширения масштабов производства и проектирования систем реакции пиролиза [4]. Для изучения процесса пиролиза различных буровых шламов лучше всего подходят методы термогравиметрического анализа (ТГА) [5]. КБШ состоят из различных компонентов, процесс пиролиза сложный, а энергия активации существенно меняется на протяжении всего процесса. Безмодельный метод (метод изопреобразования) обычно используется для оценки кинетических параметров, таких как энергия активации, и его самое большое преимущество – отсутствие риска выбора неправильной динамической модели и обнаружения необоснованных динамических параметров [6]. Метод Z-masterplot можно использовать для прогнозирования механизма реакции сложного сырья, а наиболее подходящую модель механизма реакции можно получить путем сравнения предполагаемой кинетической модели с экспериментальными данными [7]. Хотя многие исследователи изучали кинетику, термодинамические параметры и механизмы реакций процессов пиролиза нефтешламов, буровых шламов и скорлупы кокосовых орехов, о пиролизе КБШ было сообщено лишь в нескольких исследованиях [8, 9].

### Методы исследования

КБШ, использованные в данном исследовании, были получены из разведочной скважины газоконденсатного производства Западно-Казахстанской области.

#### *Кинетическая теория*

Из-за сложного состава отходов КБШ сложно описать весь процесс реакции через одну или несколько реакций в процессе пиролиза. Поэтому невозможно предсказать точный механизм реакции. В общем твердофазную реакцию пиролиза обычных твердых отходов можно описать следующей формулой [10]:



Константа скорости реакции ( $k$ ) согласно уравнению Аррениуса определяется как

$$k = Ae^{-(E/RT)}, \quad (2)$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель,  $\text{мин}^{-1}$ ,  $E$  – энергия активации реакции, Дж/моль,  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К),  $T$  – термодинамическая температура, К.

Полиномиальные скорости реакций ( $da/dt$ ) твердых топлив при пиролизе можно определить следующим образом:

$$\frac{da}{dt} = k(T)f(\alpha), \quad (3)$$

где  $k$  – константа скорости реакции,  $T$  – абсолютная температура,  $f(\alpha)$  – функция механизма реакции, а  $\alpha$  – скорость конверсии.

Объединив уравнения (2) и (3), мы получаем, что уравнение скорости реакции можно записать в виде:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-(E/RT)}f(\alpha). \quad (4)$$

В термогравиметрическом анализе значение константы скорости нагрева можно выразить как

$$\beta = \frac{dT}{dt}. \quad (5)$$

Функциональные формы  $f(\alpha)$ , представляющие различные механизмы реакции, показаны в табл. 1.

Таблица 1

**Различные кинетические модели кинетики твердого тела**

Модель реакции	Код	$f(\alpha)$	Модель реакции	Код	$f(\alpha)$
Диффузионные модели			Закон силы	P2/3	
Одномерная диффузия		$(2\alpha)^{-1}$		P2	$2\alpha^{1/2}$
Двумерная диффузия (модель Валенси)		$[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$		P3	$3\alpha^{2/3}$
Трехмерная диффузия (модель Джандера)		$\frac{3}{2}(1-\alpha^{2/3})[1-(1-\alpha^{1/3})]^{-1}$		P4	$4\alpha^{3/4}$
Трехмерная диффузия (модель Джинстлинга)		$\frac{3}{2}(1-\alpha^{2/3})[1-(1-\alpha^{1/3})]^{-1}$	Аврами–Ерофеев	A1	$\frac{3}{2}(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{1/3}$
Сигмоидальные уравнения скорости				A2	$2(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$
Праут–Томкинс	F1	$\alpha(1-\alpha)$		A3	$3(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{2/3}$
Геометрические модели сжатия				A4	$4(1-\alpha)[-\ln(1-\alpha)]^{3/4}$
Сжимающийся цилиндр	F2	$2(1-\alpha)^{1/2}$	Порядковые модели		
	F3	$2(1-\alpha)^{2/3}$	Первый порядок	R1	$(1-\alpha)$
Модели нуклеации или роста			Второй порядок	R2	$(1-\alpha)^2$
Случайное зарождение	F4	$(1-\alpha)^2$	Третий порядок	R3	$(1-\alpha)^3$
	F5	$(1-\alpha)^{3/2}$	Полуторный порядок	R6	$(1-\alpha)^{3/2}$

### **Безмодельные методы (изоконверсионные модели)**

В настоящей статье для кинетического анализа используются безмодельные методы Фридмана (МФ), Флинна–Уолла–Одзава (ФУО), Киссинджера–Акахиры–Суносе (КАС) и метод Старинка, имеющие следующие математические выражения [11].

Метод Фридмана (МФ):

$$\ln \left[ \beta_i \left( \frac{d\alpha}{dT} \right)_{\alpha,i} \right] = \ln [A_\alpha f(\alpha)] - \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha,i}}. \quad (6)$$

Метод ФУО:

$$\ln \beta_i = \ln \left[ \frac{A_\alpha E_\alpha}{Rg(\alpha)} \right] - 5,331 - 1,052 \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha,i}}. \quad (7)$$

Метод КАС:

$$\ln \left( \frac{\beta_i}{T_{\alpha,i}^2} \right) = \ln \left[ \frac{RA_\alpha}{E_\alpha g(\alpha)} \right] - \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha,i}}. \quad (8)$$

Метод Старинка:

$$\ln \left( \frac{\beta}{T^{1,92}} \right) = \ln \left[ \frac{AR}{E_\alpha g(\alpha)} \right] - 1,0008 \frac{E_\alpha}{RT_{\alpha,i}}. \quad (9)$$

Четыре безмодельных метода широко используются для расчета кинетических параметров благодаря своей простоте и не требуют выбора кинетических моделей. Все четыре безмодельных метода, использованные в данной работе, являются линейными, и только метод МФ можно использовать в случае нелинейного изменения скорости нагрева. Результаты энергии активации, измеренные методами МФ и Старинка, могут быть более точными. Однако при использовании метода МФ для преобразования данных требуется производная, что приводит к численной нестабильности и чувствительности к шуму. Относительная погрешность методов ФУО и КАС велика. Они получены в предположении, что энергия активации постоянна в ходе процесса реакции, и оба используют упрощенные приближения температурного интеграла.

### **Определение механизма реакции**

Чтобы легко и быстро проанализировать механизм реакции термического разложения твердого вещества на основе данных, Криадо разработал простой графический метод (Z-основной график), который можно описать уравнением

$$\frac{Z_\alpha}{Z_{0,5}} = \frac{f(\alpha)g(\alpha)}{f(0,5)g(0,5)} = \left( \frac{T_\alpha}{T_{0,5}} \right)^2 \left[ \frac{(d\alpha/dT)_\alpha}{(d\alpha/dT)_{0,5}} \right]. \quad (10)$$

Механизм реакции был предсказан путем сравнения графика Z-master экспериментальных значений с теоретическим графиком [12].

Путем сравнения теоретической и экспериментальной кривых была выбрана наиболее подходящая теоретическая кривая в качестве механизма реакции.

Метод Z-основного графика может предоставить подходящую модель для многофазных реакций, позволяя быстро выбрать один механизм или группу механизмов, уменьшая нагрузку на кинетический анализ. Однако в процессе расчета необходимо использовать производную для преобразования данных, что может привести к теоретическим ошибкам.

## Результаты и обсуждение

### Кинетический анализ и оценка энергии активации

На этапе разделения процесса пиролиза КБШ коэффициенты конверсии находились в диапазоне от 0,1 до 0,9, а для оценки энергии активации ( $E_a$ ) использовалось четыре метода изоконверсии (МФ, ФУО, КАС и Старинка); результат показан на рис. 1.

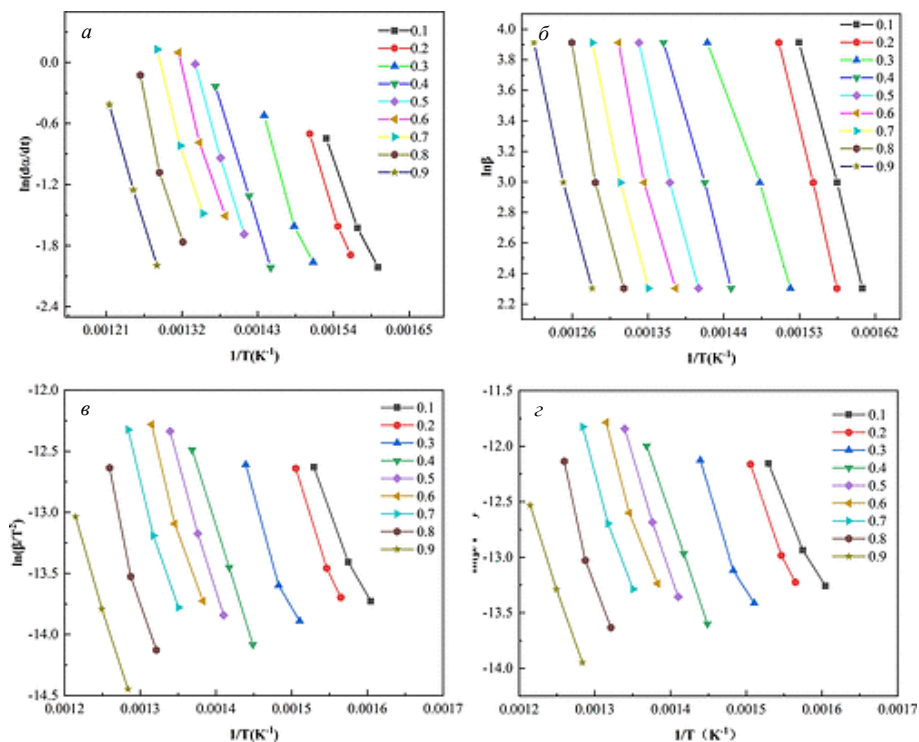


Рис. 1. Изоконверсионные модели для кинетического анализа КБШ:

$a$  – МФ;  $b$  – ФУО;  $c$  – КАС;  $d$  – метод Старинка

Энергию активации рассчитывали по наклону подобранной кривой; результаты расчетов показаны в табл. 2, а значение  $R^2$  составляло от 0,96875 до 0,9995. Средние энергии активации, полученные методами МФ, ФУО, КАС и Старинка, составили 185,5, 184,16, 166,17 и 176,03 кДж/моль соответственно. Средняя энергия активации больше по сравнению с результатами пиролиза КБШ, приведенными в работе [13]. Это может быть связано с тем, что КБШ требуется меньше энергии для улетучивания легких компонентов на стадии низкотемпературного пиролиза (80–360°C). На средне- и низкотемпературных стадиях (350–550°C) реакция пиролиза тяжелых компонентов протекает сложнее и требует больше энергии, т.е. для тщательной утилизации бурового шлама требуется больше энергии.

Таблица 2

**Энергии активации пиролиза бурового шлама,  
полученные различными безмодельными методами**

Конвер- сия	Метод Фридмана		Метод ФУО		Метод КАС		Метод Старинка	
	$E_a$ (кДж/моль)	$R^2$	$E_a$ (кДж/моль)	$R^2$	$E_a$ (кДж/моль)	$R^2$	$E_a$ (кДж/моль)	$R^2$
0,1	141,54	0,98916	168,34	0,99858	122,99	0,98574	123,63	0,98591
0,2	169,39	0,99311	207,89	0,98245	150,74	0,99134	151,36	0,99142
0,3	171,93	0,97501	177,61	0,99779	153,04	0,96875	153,67	0,96905
0,4	184,19	0,99995	157,51	0,99770	164,99	0,99994	165,63	0,99994
0,5	196,55	0,99837	180,05	0,99644	177,18	0,99802	260,88	0,99803
0,6	195,51	0,98581	186,19	0,98055	175,99	0,98264	176,63	0,98278
0,7	201,66	0,99038	191,31	0,99402	181,93	0,98828	182,58	0,98838
0,8	218,67	0,97650	204,32	0,98128	198,766	0,978	199,4	0,97201
0,9	190,07	0,99891	184,25	0,99413	169,86	0,99868	170,53	0,99869
Среднее значение	185,50		184,16		166,17		176,03	

Методами КАС и Старинка получены относительно низкие значения 166,17 и 176,03 кДж/моль соответственно, вероятно, из-за разных приближений и допущений при выводе разных моделей. Средние энергии активации, оцененные методами МФ и ФУО, очень близки и составляют 185,5 и 184,16 кДж/моль соответственно. Эти методы могут быть более подходящими, чем методы КАС и Старинка, для оценки энергии активации КБШ. Кроме того, видно, что энергия активации динамически увеличивается с увеличением скорости конверсии.

### ***Прогнозирование механизма реакции***

Компонент минерального масла в КБШ представляет собой смесь, содержащую углеводороды, такие как алканы, ароматические углеводороды и присадки. После бурения из-за воздействия высокотемпературной среды и внесения примесей состав отходов КБШ усложняется. Поэтому точно описать процесс пиролиза КБШ очень сложно. На основе Z-мастер-диаграммы Криадо [14, 15] это исследование предсказывает механизм пиролиза КБШ. На рис. 2, *а* показана зависимость экспериментальной кривой от конверсии при различных скоростях нагрева. Видно, что экспериментальная кривая постоянно меняется в зависимости от скорости конверсии, и каждая скорость конверсии соответствует различной кинетической модели.

Рисунок 2, *б* представляет собой диаграмму Z-master при 10°C/мин; коэффициент конверсии 0,1–0,2 изменился с модели R3 на модель R6, 0,2–0,4 изменился с модели R6 на модель P4, 0,4–0,7 изменился с модели F1, 0,7–0,8 изменился с модели F1 на модель F3, 0,8–0,9 следовали модели F3. Рисунок 2, *в* представляет собой диаграмму Z-master при 20°C/мин; коэффициент конверсии 0,1–0,3 изменился с модели R6 на модель F1, 0,3–0,6 с модели F1, 0,6–0,7 – с модели D2, 0,7–0,8 – с модели D2 на модель F3, 0,8–0,9 следовал модели F3. Рисунок 2, *г* представляет собой диаграмму Z-master

при 50°C/мин; коэффициент конверсии 0,1–0,2 изменился от модели R6 к модели R1, 0,2–0,5 – от модели R1, 0,5–0,6 – от модели P4, 0,6–0,7 – от модели D2, 0,7–0,8 – от модели D2 к модели модель F3, а 0,8–0,9 – модель F3.

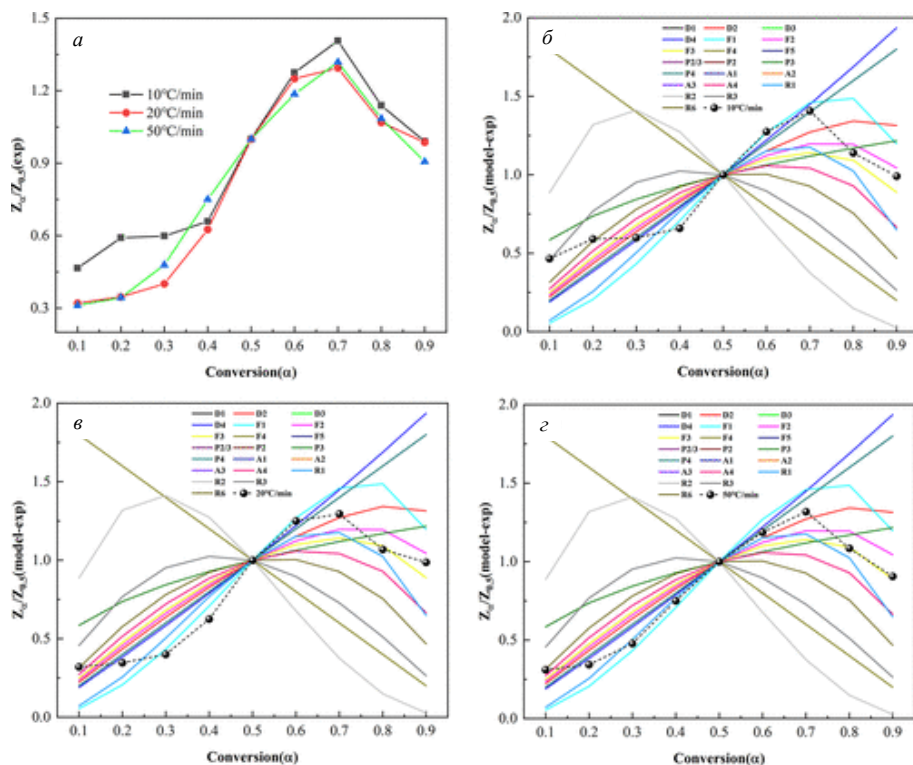


Рис. 2. Экспериментальные и теоретические Z-мастер-графики для прогнозирования механизмов реакции: *a* – Z-мастер-график экспериментов при различных скоростях нагрева; *b* – Z-мастер-график при 10°C/мин; *c* – Z-мастерный график при 20°C/мин; *d* – график Z-master при 50°C/мин.

Таблица 3

Переход модели пиролиза при различных скоростях нагрева

Конверсия	Скорость нагрева (°C/мин)		
	10	20	30
0,1–0,2	R3–R6	R6–F1	R6–R1
0,2–0,3	R6–P4	R6–F1	R1
0,3–0,4	R6–P4	F1	R1
0,4–0,5	F1	F1	R1
0,5–0,6	F1	F1	P4
0,6–0,7	F1	D2	D2

В табл. 3 показан процесс трансформации модели пиролиза КБШ при различных скоростях нагрева. Видно, что механизм реакции КБШ очень сложен при более низких скоростях нагрева, что может быть причиной того,



что более высокие скорости нагрева были выбраны для прогнозирования механизма реакции твердого тела.

### **Заключение**

КБШ пиролизовали при скоростях нагрева 10, 20 и 50°С/мин с помощью ТГА-анализатора. Пиролиз КБШ разделяют на три стадии, основная реакция протекает на второй стадии (350–550°С). Средние энергии активации, полученные безмодельными методами Ю, составляют 185,5, 184,16, 166,17 и 176,03 кДж/моль. Средняя энергия активации, оцененная методами МФ и ФУО, очень близка. Кроме того, по мере развития процесса пиролиза увеличивается и необходимая энергия активации. При разных скоростях конверсии и скоростях нагрева используемые кинетические модели различаются, что также показывает, что механизм процесса пиролиза КБШ очень сложен и весь процесс реакции сложно описать одной или несколькими реакциями.

Таким образом, анализ кинетики и механизма реакции пиролиза бурового шлама полезен для оптимизации параметров процесса и повышения выхода извлеченного минерального масла. Данное исследование может способствовать улучшению эффекта использования ресурсов пиролиза КБШ, который имеет большое значение для экологически безопасной разработки газоконденсатного производства.

### **Список источников**

1. Владимиров В.С., Корсун Д.С., Карпухин И.А., Мойзис С.Е. Переработка и утилизация нефтешламов резервуарного типа // *Экология производства*. 2007. № 2(8). С. 3–5.
2. Larina O.G., Ovcharov S.N., Kalinichenko A.Yu. Physico-chemical analysis of the formation of porous structure and performance properties of thermally modified sorbents for wastewater purification // *Наука. Инновации. Технологии*. 2018. № 3. С. 195–208.
3. Kaisersberger E., Opfermann J. Kinetic evaluation of exothermal reactions measured by DSC // *Thermochimica Acta*. 1991. Vol. 187. P. 151–158.
4. Adhikari S., Fernando S. Hydrogen Membrane Separation Techniques // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006. Vol. 45 (3). P. 875–881.
5. Pandey D.S., Katsaros G., Lindfors C., Leahy J.J., Tassou S.A. Fast Pyrolysis of Poultry Litter in a Bubbling Fluidised Bed Reactor // *Energy and Nutrient Recovery. Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 25–33.
6. Ержанова Н.С., Кузьмина Р.И., Кунашева З.Х. Исследование свойств твердого остатка пиролиза бурового шлам // *Вестник Технологического университета*. 2021. № 6. С. 64–68.
7. Ержанова Н.С., Кузьмина Р.И., Кунашева З.Х. Пиролиз как метод обработки отходов // *Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии : межвуз. сб. науч. тр. Саратов*, 2021. С. 283–286.
8. Zou C., Zhao Q., Cong L., Wang H., Shi Z., Wu J., Pan S. Development progress, potential and prospects of shale gas in China // *Tianranqi Gongye*. 2021. Vol. 41. P. 1–14.
9. Liu H., Li J., Zhao M., Li Y., Chen Y. Remediation of oil-based drill cuttings using low-temperature thermal desorption: performance and kinetics modeling // *Chemosphere*. 2019. Vol. 235. P. 1081–1088.

10. Chen D., Zhuang X., Gan Z., Cen K., Ba Y., Jia D. Co-pyrolysis of light bio-oil leached bamboo and heavy bio-oil: effects of mass ratio, pyrolysis temperature, and residence time on the biochar // *Chemical Engineering*. 2022. Vol. 437. P. 135–253.
11. Hu Y., Xia Y., Di Maio F., Yu F., Yu W. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (pahs) formed in three-phase products from the pyrolysis of various wastewater sewage sludge // *Hazardous Materials*. 2020. Vol. 389. P. 122–245.
12. Бахонина Е.И. Современные технологии переработки и утилизации углеводород-содержащих отходов // *Башкирский химический журнал*. 2015. № 1. С. 20–29.
13. Olah G.A., Prakash K.S., Williams R.E., Wade K. *Hypercarbon Chemistry*. New York : Wiley, 2011. 480 p.
14. Поп П., Петре К., Поп Е. Кинетика реакций пиролиза н-гептана в присутствии катализаторов на основе окисей металлов и синтетических алюмосиликатов // *Нефтехимия*. 1979. Т. 19, № 4. С. 587–591.
15. Аббасов В.М., Мир-Гашимова Л.И., Магеррамов Р.С., Гасымов З.З., Бадалов М.А., Набибекова Х.А., Тихонова Э.А. Изучение кинетики и механизма нитрования олефиновых углеводородов // Научная конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Д.И. Менделеева : тез. докл. Омск, 1984. С. 78.

### References

1. Vladimirov V.S., Korsun D.S., Karpukhin I.A., Moizis S.E. Processing and disposal of tank-type oil sludge. *Ecology of Production*. 2007. №2(8). P. 3–5.
2. Larina O.G., Ovcharov S.N., Kalinichenko A.Yu. Physico-chemical analysis of the formation of porous structure and performance properties of thermally modified sorbents for wastewater purification. *Science. Innovation. Technologies*. 2018. №3. P. 195–208.
3. Kaisersberger E., Opfermann J. Kinetic evaluation of exothermal reactions measured by DSC. *Thermochimica Acta*. 1991. Vol. 187. P. 151–158.
4. Adhikari S., Fernando S. Hydrogen Membrane Separation Techniques. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2006. Vol. 45(3). P. 875–881.
5. Pandey D.S., Katsaros G., Lindfors C., Leahy J.J., Tassou S.A. Fast Pyrolysis of Poultry Litter in a Bubbling Fluidised Bed Reactor. *Energy and Nutrient Recovery. Sustainability*. 2019. Vol. 11. P. 25–33.
6. Yerzhanova N.S., Kuzmina R.I., Kunasheva Z.Kh. Study of the properties of solid residue from pyrolysis of drill cuttings. *Bulletin of KNRTU*. 2021. Vol. 6. P. 64–68.
7. Yerzhanova N.S., Kuzmina R.I., Kunasheva Z.Kh. Pyrolysis as a waste treatment method. *Interuniversity collection of scientific papers "Modern problems of theoretical and experimental chemistry"*. Saratov, 2021. P. 283–286.
8. Zou C., Zhao Q., Cong L., Wang H., Shi Z., Wu J., Pan S. Development progress, potential and prospects of shale gas in China. *Tianranqi Gongye*. 2021. Vol. 41. P. 1–14.
9. Liu H., Li J., Zhao M., Li Y., Chen Y. Remediation of oil-based drill cuttings using low-temperature thermal desorption: performance and kinetics modeling. *Chemosphere*. 2019. Vol. 235. P. 1081–1088.
10. Chen D., Zhuang X., Gan Z., Cen K., Ba Y., Jia D. Co-pyrolysis of light bio-oil leached bamboo and heavy bio-oil: effects of mass ratio, pyrolysis temperature, and residence time on the biochar. *Chemical Engineering*. 2022. Vol. 437. P. 135–253.
11. Hu Y., Xia Y., Di Maio F., Yu F., Yu W. Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (pahs) formed in three-phase products from the pyrolysis of various wastewater sewage sludge. *Hazardous Materials*. 2020. Vol. 389. P. 122–245.
12. Baxonina E.I. Modern technologies for processing and disposal of hydrocarbon-containing waste. *Bashkir Chemical Journal*. 2015. № 1. P. 20–29.
13. Olah G.A., Prakash K.S., Williams R.E., Wade K. *Hypercarbon Chemistry*. New York : Wiley. 2011. 480 p.

14. Pop P., Petre K., Pop E. Kinetics of n-heptane pyrolysis reactions in the presence of catalysts based on metal oxides and synthetic aluminosilicates // *Petrochemistry*. 1979. Vol. 19. №4. P. 587–591.
15. Abbasov V.M., Mir-Gashimova L.I., Magerramov P.S., Gasimov3.3., Badalov M.A., Nabibekova Kh.A., Tikhonova E.A. Study of the kinetics and mechanism of nitration of olefinic hydrocarbons: abstracts // *Scientific conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of D.I. Mendeleev*. Omsk, 1984. P. 78.

***Сведения об авторах:***

**Ержанова Нургүль Сандибаевна** – аспирант Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия). E-mail: nurgul.yerzhanova@mail.ru

**Кузьмина Раиса Ивановна** – профессор, доктор химических наук Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия). E-mail: kuzmina@mail.ru

***Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.***

***Information about the authors:***

**Yerzhanova Nurgul S.** – Postgraduate, Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky (Saratov, Russian Federation). E-mail: nurgul.yerzhanova@mail.ru

**Kuzmina Raisa I.** – Professor, Doctor of Chemical Sciences, Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky (Saratov, Russian Federation). E-mail: kuzmina@mail.ru

***Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.***

*Статья поступила в редакцию 02.05.2024; принята к публикации 29.09.2025*  
*The article was submitted 02.05.2024; accepted for publication 29.09.2025*