УДК 541.128:665.5:678.7

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ В ПРИСУТСТВИИ НАНОКАТАЛИЗАТОРА, КАТАЛИТИЧЕСКИХ ДОБАВОК И ПОЛИМЕРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ

© 2021 г. А. Т. Едрисов<sup>1</sup>, Д. Е. Айтбекова<sup>1,\*</sup>, А. Тусипхан<sup>1</sup>, А. Б. Татеева<sup>1</sup>, Г. Г. Байкенова<sup>2,3</sup>, М. И. Байкенов<sup>1,\*\*</sup>, Д. А. Кайкенов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, Караганда, 100028 Республика Казахстан <sup>2</sup> Карагандинский экономический университет Казпотребсоюза, Караганда, 100009 Республика Казахстан <sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, 454080 Россия E-mail: \*darzhan91@mail.ru; \*\*murzabek b@mail.ru

Поступила в редакцию 03 июля 2019 г. После доработки 12 февраля 2021 г. Принята к публикации 12 апреля 2021 г.

Экспериментально определены термокинетические параметры термического разложения высоковязкой нефти месторождения Каражанбас Республики Казахстан в присутствии нанокатализатора Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, каталитических добавок (микросфера, полученная из золы углей, никелевая каталитическая добавка в микросфере) и полимеров в качестве доноров водорода (полиэтиленгликоль, полистирол). Термокинетические параметры разложения высоковязкой нефти (энергия активации, предэкспоненциальный множитель и константы скорости), находящиеся в зависимости от присутствия нанокатализатора, каталитических добавок и полимеров, были рассчитаны с использованием методов термогравиметрического анализа в инертной атмосфере азота. Полученные экспериментальные результаты (потеря массы и скорость потери массы высоковязкой нефти от температуры) и расчетные значения термокинетических параметров ее разложения могут быть использованы для создания базы данных, целесообразной для проведения математического моделирования переработки высоковязких нефтей и тяжелых нефтяных остатков.

**Ключевые слова:** высоковязкая нефть, термогравиметрия, термокинетические параметры, полистирол, полиэтиленгликоль

**DOI:** 10.31857/S0028242121030035

Необходимо отметить, что в мире наметилась тенденция к снижению темпов прироста запасов традиционных видов углеводородного сырья, в том числе и классической нефти. В связи с этим большое внимание уделяется поиску эффективных методов переработки тяжелых высоковязких нефтей (ВВН).

Известно, что высоковязкие нефти Республики Казахстан (РК) характеризуются низким содержанием легких и средних углеводородных фракций, высоким содержанием асфальтеновых веществ, общей серы и тяжелых металлов, таких как ванадий и никель. Высокое содержание последних не позво-

ляет эффективно перерабатывать тяжелые нефти по технологиям, существующим в РК, в связи с быстрой и необратимой дезактиваццией промышленных катализаторов.

Одним из способов переработки тяжелого углеводородного сырья (тяжелый нефтяной остаток, высоковязкая нефть, мазут, уголь) является термический крекинг в присутствии полимерных материалов и катализаторов. Полимерные материалы, такие как полиэтилен, полипропилен, полистирол [1–5] и другие имеют высокое содержание водорода (до 14 мас. %), что позволяет им быть источником водорода в процессах гидрогенизационной [6]

**Таблица 1.** Физико-химические характеристики высоковязкой нефти месторождения Каражанбас РК

Показатели	Значения	
Плотность, $\kappa \Gamma/M^3$	943.1	
Вязкость кинематическая при 30 °C, сСт	539	
Молекулярная масса, г/моль	384	
Содержание, мас. %		
парафинов	1.5	
асфальтенов	4.9	
смол	24.2	
Элементный состав, %		
C	82.5	
Н	11.8	
N	0.9	
S	2.6	
O	2.3	
Коксуемость, %	7.2	
Выход фракций, %		
до 200°С	2.6	
200–250°C	3.0	
250–300°C	6.8	
300–350°C	10.1	
Содержание металлов, г/т		
ванадия	320	
никеля	65–70	

и термической переработки [7] тяжелого и твердого углеводородного сырья.

Из литературы [7] известно, что использование линейных полимеров оказывает положительное влияние на результаты совместной гидрогенизации с гудроном. Однако в литературе пока существует лишь ограниченное количество работ, посвященных использованию полимерных материалов в качестве доноров водорода в процессе гидрогенизации тяжелых нефтяных остатков и высоковязких нефтей.

Цель настоящей работы — определение термокинетических параметров разложения смеси высоковязкой нефти и полимеров в присутствии нанокатализатора и каталитических добавок.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования — высоковязкая нефть месторождения Каражанбас РК. В табл. 1 представлены физико-химические показатели этой ВВН. Ее молекулярная масса была определена криоскопическим методом.

Для проведения опытов был использован нанокатализатор Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, диаметр которого составляет 15 нм [8], а также каталитические добавки — микросферы, полученные из золы углей РК и нанесенные на поверхность микросфер соли никеля (NiO/микросфера) методом «мокрого смешения» [9]. Микросферы, полученные из золы угля, показали высокую эффективность при термическом разложении тяжелых нефтяных остатков [10]. Ранее было известно [11] об эффективности использования таких нанокаталитических добавок, как микросфера и NiO/микросфера в процессе гидрогенизации модельной смеси антрацена и фенантрена.

Известно [12, 13], что синтетические полимеры широко используются в качестве донора водорода в процессах ожижения углей до «угольной нефти». Однако, в литературе данных по использованию полиэтиленгликоля и полистирола в качестве добавки в процессах термического разложения ВВН нет.

В нашей работе были исследованы следующие полимеры — полиэтиленгликоль (ООО «Завод синтанолов» РФ, M=6000 г/моль, х.ч.) и полистирол (ООО «Завод синтанолов» РФ, M=300000 г/моль, х.ч.).

При термической деструкции полистирола образуются высоко реакционноспособные атомы водорода [14], которые, возможно, стабилизируют свободные радикалы, образующиеся при термической деструкции ВВН.

Как известно, полиэтиленгликоль применяется в качестве катализатора фазового перехода, увеличивая скорость реакции на границе твердой и жидкой фаз [15, 16]. Известно также, что донорно-акцепторные свойства полиэтиленгликоля можно регулировать замещением ОН-групп, например, аминогруппами или оксидами металлов [17].

Индивидуальный химический состав микросферы, использованной в качестве каталитической добавки, а также в качестве подложки для нанесения растворов солей никеля, были определены по ГОСТу 10538-87, %:  $SiO_2$  (56.92),  $Al_2O_3$  (35.96),  $Fe_2O_3$  (2.97), CaO (0.78), MgO (1.25),  $K_2O$  (0.83),  $Na_2O$  (0.92),  $P_2O_5$  (0.09), MnO (0.04),  $TiO_2$  (1.72).

Для исключения диффузионных эффектов и обеспечения гомогенности процесса при приготовлении навески для термогравиметрического анали-

за брали 4 г  $Al_2O_3$ , помещали в тигель и обжигали при температуре  $600^{\circ}$ С в течение 2 ч в муфельной печи. После обжига навеску высущивали в эксикаторе.

К 0.2 г высоковязкой нефти добавляли 0.04 г полимера, 1% от массы нефти нанокатализатора или каталитической добавки — оптимальное количество, необходимое для декструктивной гидрогенизации сырья [8], 3.0 г высушенного  $Al_2O_3$  и перемешивали до однородной консистенции.

Термический анализ высоковязкой нефти и смеси, состоящей из высоковязкой нефти, нанокатализатора, каталитических добавок и полимеров, проводили с использованием приборов марки LABSYSTM EVO TG, DTA, DSC 1600°C (Setaram, Франция). Образец массой 17 мг (точность взвешивания ±0.01%) помещали в корундовый тигель объемом 2 мл, с постоянной скоростью нагрева 10 К/мин от 298 К до 783 К в среде азота. Расход газовой среды 30 мл/мин.

К изучению кинетики процессов термической деструкции по данным термогравиметрического анализа существует ряд подходов. Наиболее разработан подход для тех случаев, когда процесс проходит в одну стадию или стадии далеко разнесены по температурным интервалам и потому легко поддаются разделению на отдельные брутто-процессы. Как правило, предполагают протекание процесса по уравнению скорости реакции порядка x, подчиняющейся уравнению Аррениуса:

$$\frac{dm}{d\tau} = -k_0 e^{-E/RT} m^x,$$

где m — масса нелетучего вещества пробы (мг) в момент времени  $\tau$  (мин); E — энергия активации, кДж/моль;  $k_0$  — предэкспоненциальный множитель, мин<sup>-1</sup>; R — универсальная газовая постоянная, кДж/моль; T — абсолютная температура, K; x — порядок реакции.

Следует заметить, что в данном случае речь должна идти не о кинетических константах вполне определенных реакций индивидуальных веществ, а о некоторых параметрах суммарных процессов термического разложения, описывающих зависимость изменения общей массы образца при повышении его температуры с определенной скоростью. По этой причине, часто невозможно использовать величины  $k_0$ , E, x, определенные в одних условиях термической деструкции, для описания термиче-

ского разложения того же вещества в других условиях, например с другой скоростью подъема температуры.

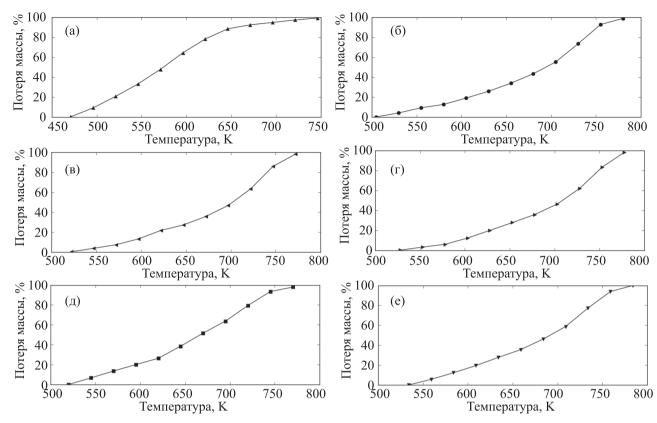
В монографии А.М. Гюльмалиева [18] и в статье В.С. Папкова [19], где представлен метод определения кинетических параметров термического разложения углей по данным термогравиметрического анализа используют одну точку кривой термогравиметрии с максимальной скоростью деструкции, а полученные результаты переносят на всю кривую в целом, что не всегда обоснованно. Тем более, такой способ не приемлем при недостаточной определенности системы, включающей три неизвестных параметра. Например, сначала по степени превращения массы исходного вещества в точке перегиба оценивают порядок реакции деструкции, а затем, зная порядок, степень превращения и температуру в этой точке, определяют энергию активации и предэкспоненциальный множитель изучаемого процесса. Очевидно, что при таком подходе при расчете каждого следующего параметра ошибка его определения нарастает очень быстро. Определенность системы можно повысить, приняв x = 1, что для процессов деструкции часто является оправданным. Выбор первого порядка выгоден также тем, что размерность  $k_0$  включает тогда только время, и безразлично, в каких единицах измеряется количество вещества.

Более перспективен метод определения кинетических параметров процесса термодеструкции углеродсодержащих веществ, который описывает весь участок кривой термогравиметрии, относящейся к одной брутто-стадии. Этот метод опробован в работах Т.В. Бухаркиной [20] и С.Ю. Лырщикова [21].

В работе кинетические параметры (константа скорости, энергия активации и предэкспоненциальный множитель) термического разложения высоковязкой нефти и смеси высоковязкой нефти с катализаторами и полимерами рассчитывали по методам, представленным в работах как Т.В. Бухаркиной, так и А.М. Гюльмалиева.

# РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Термогравиметрические кривые потери массы и скорости потери массы в инертной атмосфере для ВВН в присутствии нанокатализатора, каталитиче-



**Рис. 1.** Термогравиметрические кривые потери массы для образцов высоковязкой нефти в присутствии нанокатализатора, каталитических добавок и полимеров: (а) образец 1, высоковязкая нефть; (б) образец 2, ВВН в присутствии полистирола; (в) образец 3, ВВН в присутствии полистирола с нанокатализатором Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; (г) образец 4, ВВН в присутствии полиэтиленгликоля, (д) образец 5, ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с NiO/микросфера; (е) образец 6, ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с микросферой. Составы исследуемых образцов приведены выше.

ских добавок и доноров водорода представлены на рис. 1 и рис. 2.

На рис. 1 показано, что потеря массы ВВН начинается от 471 K, а при добавлении различных каталитических добавок и полимеров температура термического разложения высоковязкой нефти увеличивается приблизительно на 50 K. Составы образцов смесей ВВН с полимерами и катализаторами в массовых долях приведены ниже:

Образец 1. ВВН без добавок.

Образец 2. В присутствии полистирола - 0.833:0.167.

Образец 3. В присутствии полистирола с нанокатализатором  $\text{Fe}_3\text{O}_4 - 0.826 : 0.165 : 0.008$ .

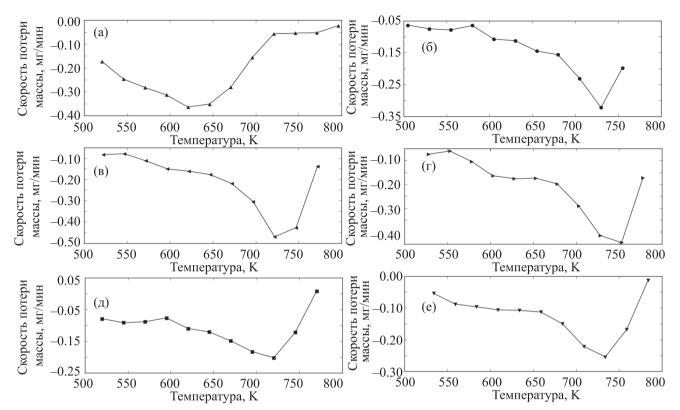
Образец 4. В присутствии полиэтиленгликоля – 0.833:0.167.

Образец 5. В присутствии полиэтиленгликоля с NiO/микросфера — 0.826:0.165:0.008.

Образец 6. В присутствии полиэтиленгликоля с микросферой – 0.826:0.165:0.008.

Сравнив термогравиметрические кривые потери массы смесей высоковязкой нефти с полистиролом и полиэтиленгликолем (рис. 16 и 1г), приходим к выводу, что для второго образца в диапазоне температур  $\sim$ 505 К ...  $\sim$ 730 К происходит убыль массы, о чем свидетельствует ход кривой потери массы (для второго образца  $\sim$ 70%, а для четвертого образца  $\sim$ 60%).

На рис. 2 приведены скорости потери массы при термическом разложении образцов ВВН в присутствии нанокатализаторов, полимеров и добавок. Самая высокая скорость потери массы наблюдается в присутствии полистирола с нанокатализатором Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, самая низкая — в присутствии полиэтиленгликоля с NiO/микросфера.



**Рис. 2.** Термогравиметрические кривые скорости потери массы для высоковязкой нефти в присутствии нанокатализатора, каталитических добавок и полимеров: (а) образец 1, высоковязкая нефть; (б) образец 2, ВВН в присутствии полистирола; (в) образец 3, ВВН в присутствии полистирола с нанокатализатором Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:0.008); (г) образец 4, ВВН в присутствии полиэтиленгликоля; (д) образец 5, ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с NiO/микросфера; (е) образец 6, ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с микросферой. Составы исследуемых образцов приведены выше.

Для образца 2 – ВВН с полистиролом, при температуре 730 К максимальная скорость потери массы составляет ~0.33 мг/мин, для образца 4 – ВВН с полиэтиленгликолем, максимальная скорость потери массы ~0.45 мг/мин проявляется при 750 К. При добавлении нанокатализатора Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в смесь, состоящую из высоковязкой нефти и полистирола, скорость потери массы увеличивается и составляет ~0.45 мг/мин. Добавление микросфер и NiO/микросфер в смесь, состоящую из высоковязкой нефти и полиэтиленгликоля, приводит к тому, что при температурах 700–750 К максимальная скорость потери массы составляет ~0.20–0.25 мг/мин.

В результате термического разложения самая высокая скорость потери массы (рис. 2) наблюдается в высоковязкой нефти в присутствии полистирола с нанокатализатором  $Fe_3O_4$ , а самая низкая — при термическом разложении высоковязкой нефти в присутствии полиэтиленгликоля с NiO/микросферами.

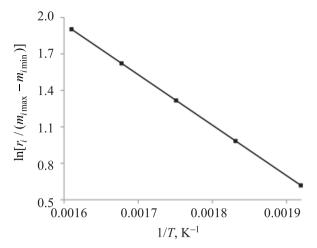
По-видимому, изменение скорости потери массы от температуры (рис. 2) связано с наличием в системе термопластичной и эластичной фаз, каждая из которых в зависимости от природы полимеров и катализаторов оказывает влияние на процесс термодеструкции ВВН.

Данные термогравиметрии линеаризуются в координатах

$$\ln[r_i/(m_{i\max}-m_{i\min})]-f\left(\frac{1}{T}\right),$$

где  $r_i$  — скорость i-той стадии реакции первого порядка, мг/мин;  $m_i$  — текущая масса выделившихся на данной стадии летучих веществ, мг; T — абсолютная температура, K (рис. 3). Из уравнения прямой определяется энергия активации и предэкспоненциальный множитель.

Полученные термокинетические параметры (предэкспоненциальный множитель  $k_0$  и энергия



**Рис. 3.** Линеаризация температурной зависимости скорости термодеструкции высоковязкой нефти.

активации E) разложения высоковязкой нефти и смесей высоковязкой нефти с нанокатализатором, каталитическими добавками и полимерами, рассчитанные по методу термогравиметрического анализа, приведенному в работе [20], представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, самая высокая величина энергии активации и предэкспоненциального множителя разложения **BBH** составляет 41.47 кДж/моль и  $8.6 \times 10^3$  с $^{-1}$  соответственно в присутствии полиэтиленгликоля с микросферой, а низкое значение энергии активации разложения и предэкспоненциального множителя ВВН составляет 15.9 кДж/моль в присутствии полистирола и  $5.74 \, \mathrm{c}^{-1}$  в присутствии полиэтиленгликоля соответственно. В интервале температур 697-722 К наблюдается наивысшая скорость потери массы исследованного образца смеси ВВН с полистиролом и нанокатализатором  $Fe_3O_4$  (рис. 2), что согласуется с величиной энергии активации 22.3 кДж/моль, Низкое значение скорости потери массы наблюдается для смеси ВВН с полиэтиленгликолем и NiO/микросфера в интервале температур 695—720 K, а величина энергии активации составляет 30.74 кДж/моль.

Необходимо отметить, что метод расчета термокинетических параметров с использованием всей кривой показывает слабую корреляцию между величинами энергий активации термодеструкции смесей ВВН.

Из табл. 2. видно также, что величина энергии активации в процессе разложения исходной высоковязкой нефти составляет 34.5 кДж/моль, а для смеси, состоящей из ВВН и полиэтиленгликоля, микросферы значение энергии активации возрастает до 41.47 кДж/моль. Также добавление в систему полистирола в качестве донора водорода приводит к уменьшению энергии активации разложения высоковязкой нефти до 15.9 кДж/моль.

Из литературы известно, что в термических процессах третичные атомы водорода полистирольных цепей высоко реакционноспособны по отношению к свободным радикалам [14], а полиэтиленгликоль может выступать в качестве катализатора фазового перехода [16].

Из литературы [22] известно, что для определения кинетических закономерностей деструкции тяжелого углеводородного сырья используются методы неизотермической кинетики и динамической термогравиметрии, которые позволяют рассчитать значения энергии активации, энтальпии и энтропии термодеструкции тяжелого углеводородного сырья при обработке термогравиметрической кривой. Кинетические параметры (константа скорости k и энергия активации E) термического разложения

**Таблица 2.** Термокинетические параметры термического разложения высоковязкой нефти и смесей высоковязкой нефти с нанокатализатором, каталитическими добавками и полимерами (по работе Бухаркиной, [20])

№ образца	Состав образца	Диапазон температур, К	$k_0, c^{-1}$	Е, кДж/моль
1	Высоковязкая нефть	471–621	$5.4 \times 10^3$	34.50
2	ВВН в присутствии полистирола	505-730	78.7	15.90
3	ВВН в присутствии полистирола с нанокатализатором Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	522-722	202.1	22.30
4	ВВН в присутствии полиэтиленгликоля	528-753	5.74	30.30
5	ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с NiO/микросфера	520-745	$1.24 \times 10^{3}$	30.74
6	ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с микросферой	534-759	$8.6 \times 10^3$	41.47

№ образца	Состав образца	Диапазон температур, К	<i>k</i> ×10 <sup>-2</sup> , мин <sup>-1</sup>	Е, кДж/моль
1	Высоковязкая нефть	471–621	3.56	161.88
2	ВВН в присутствии полистирола	505-730	1.07	45.96
3	ВВН в присутствии полистирола с нанокатализатором Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	522–722	0.74	26.34
4	ВВН в присутствии полиэтиленгликоля	528-753	0.67	21.92
5	ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с NiO/микросфера	520-745	1.03	36.54
6	ВВН в присутствии полиэтиленгликоля с микросферой	534–759	1.00	37.32

**Таблица 3.** Термокинетические параметры термического разложения высоковязкой нефти и смесей высоковязкой нефти с нанокатализатором, каталитическими добавками и полимерами (по работе Гюльмалиева [18])

высоковязкой нефти и смесей высоковязкой нефти с нанокатализатором, каталитическими добавками и полимерами, рассчитанные по методу термогравиметрического анализа, приведенному в работе [18], представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что при добавлении в высоковязкую нефть доноров водорода и нанокатализатора, каталитических добавок энергии активации, а также и температура разложения значительно уменьшаются. При термическом разложении высоковязкой нефти константа скорости равна  $3.56\times10^{-2}$  мин $^{-1}$ , а самое низкое значение константы скорости было получено при термическом разложении ВВН в присутствии полиэтиленгликоля.

Величины энергий активации термического разложения образцов (табл. 2, 3) различаются. Возможно это связано с тем, что в методе, представленном в работе Гюльмалиева, используется точка перегиба зависимости потери массы от температуры, а в методе, представленном в работе Бухаркиной – зависимость скорости термодеструкции ВВН от температуры в каждой точке.

Таким образом, метод термогравиметрии позволяет успешно изучать влияние различных факторов на термическое разложение высоковязкой нефти. Добавляя к высоковязкой нефти катализатор, каталитические добавки и полимеры можно изменять скорость процесса термического разложения тяжелого углеводородного сырья.

Методы, представленные в работах А.М. Гюльмалиева и Т.В. Бухаркиной, позволяют рассчитывать кинетические параметры термического разложения высоковязкой нефти и смесей. Первый метод [18] наиболее приемлем для определения скорости

термического разложения тяжелого углеводородного сырья. Он заключается в использовании по одной точке перегиба на термогравиметрической кривой, позволяющей с высокой точностью определить термокинетические параметры процесса деструкции высоковязкой нефти (порядок реакции, константу скорости, предэкспоненциальный множитель и энергию активации). Во втором методе [20] термогравиметрическая кривая (зависимость веса образца от температуры при заданной скорости нагрева) представлят собой кривую наклона касательной в каждой точке, с помощью которой определяется скорость деструкции при данной температуре и данной степени разложения. К недостаткам метода следует отнести значительную неточность из-за трудности определения наклона касательной, а также большую трудоемкость расчета.

# ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Едрисов Азамат Тиржанович, д.х.н., проф., ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3047-8200

Айтбекова Даржан Ергалиевна, докторант, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6839-9711

Тусипхан Алмас, PhD, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6452-4925

Татеева Алма Баймаганбетовна, к.х.н., проф., https://orcid.org/0000-0002-4538-9457

Байкенова Гульжан Гаусильевна, д.х.н., проф., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2816-3341

Байкенов Мурзабек Исполович, д.х.н., проф., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8703-0397

Кайкенов Даулет Асанович, PhD

# ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках программы исследований «Термохимическая переработка тяжелых нефтяных остатков в смеси с первичной каменноугольной смолой в атмосфере коксового газа» при поддержке гранта Министерства образования науки Республики Казахстан (Инвентарный № 0215РК969).

# КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Ali M.F., Siddiqui M.N., Redhwi H.H.* Study on the conversion of waste plastics/petroleum resid mixtures to transportation fuels // J. Mater. Cycles Waste Manag. 2004. V. 6. № 1. P. 2734. https://doi.org/10.1007/s10163-003-0102-x
- 2. *Siddiqui M.N.*, *Redhwi H.H.* Catalytic coprocessing of waste plastics and petroleum residue into liquid fuel oils // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2009. V. 86. № 1. P. 141–147. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.05.002
- 3. *Ali M.F., Qureshi M.S.* Transportation fuels from catalytic co-pyrolysis of plastic wastes with petroleum residues: evaluation of catalysts by thermogravimetric analysis // Petrol. Sci. and Technol. 2013. V. 31. № 16. P. 1655–1673. https://doi.org/10.1080/10916466.2010. 551239
- 4. *Ali M.F.*, *Siddiqui M.D.* Thermal and catalytic decomposition behavior of PVC mixed plastic waste with petroleum residue // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2005. V. 74. № 1–2. P. 282–289. https://doi.org/10.1016/j. jaap.2004.12.010
- Ahmaruzzaman M., Sharma D.K. Characterization of liquid products obtained from cocracking of petroleum vacuum residue with plastics // Energy Fuels. 2006.
  V. 20. № 6. P. 2498–2503. https://doi.org/10.1021/ef060070c
- 6. Кадиев Х.М., Дандаев А.У., Гюльмалиев А.М., Батов А.Е., Хаджиев С.Н. Гидроконверсия полиэтилена и шинной резины в смеси с тяжелыми нефтяными остатками // Химия твердого топлива. 2013. № 2. С. 65–72. https://doi.org/10.7868/S0023117713020059
- 7. Грингольц М.Л., Дементьев К.И., Кадиев Х.М., Максимов А.Л., Финкельштейн Е.Ш. Химическая переработка отходов полимеров в моторные топлива и нефтехимическое сырье (обзор) // Нефтехимия. 2020. № 4. С. 464–475. https://doi.org/10.31857/S002824212004005X

- 8. Yizhao Li, Fengyun Ma, Xintai Su, Chao Sun, Jian-chao Liu, Zhiqiang Sun, Yanglong Hou Synthesis and catalysis of oleic acid-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals for direct coal liquefaction // Catalysis Communications. 2012. № 26. P. 231–234. https://doi.org/10.1016/j. catcom.2012.06.002
- 9. *Зимон А.Д.* Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 413 с.
- Колытов М.А., Головко А.К., Кирик Н.П., Аншиц А.Г. Термические превращения высокомолекулярных компонентов тяжелых нефтяных остатков // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 1. С. 16–21. https://doi.org/10.7868/ S0028242113010085
- 11. Айтбекова Д.Е., Ма Фэн Юн, Мейрамов М.Г., Байкенова Г.Г., Кумаков Ф.Е., Тусипхан А., Мухаметжанова С.К., Байкенов М.И. Каталитическая гидрогенизация модельной смеси антрацена и фенантрена // Химия твердого топлива. 2019. Т. 53. № 4. С. 46–55. https://doi.org/10.1134/S0023117719040029
- 12. *Кузнецов Б.Н.*, Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов. Новосибирск: СО РАН, 2012. 212 с.
- 13. *Dominguez A., Blanco C.G., Barriocanal C.* Gas chromatographic study of the volatile products from co-pyrolysis of coal and polyethylene wastes // J. of Chromatography A. 2001. V. 918. № 1. P. 135–144. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)00736-1
- 14. *Fettes E.M.*, Chemical reactions of polymers. New York: Interscience Publishers a division of John Wiley and Sons, 1964. 536 p.
- Totten G.E., Clinton N.A. Poly[ethylene glycol] derivatives as phase transfer catalysts and solvents for organic reactions // Macromol. Chem. Phys. 1988.
  V. 28. № 2. P. 293–337. https://doi.org/10.1080/15583728808085378
- 16. *Ji Chen, Scott K.S., Jonathan G.H., Robin D.R.* Polyethylene glycol and solutions of polyethylene glycol as green reaction media // Green Chemistry. 2005. № 7. P. 64–82. https://doi.org/10.1039/B413546F
- 17. Pereira J.F., Kurnia K.A., Freire M.G., Coutinho J.A., Rogers R.D. Controlling the formation of ionic-liquid-based aqueous biphasic systems by changing the hydrogen-bonding ability of polyethylene glycol end groups // ChemPhysChem. 2015. V. 16. № 10. P. 2219—2225. https://doi.org/10.1002/cphc.201500146
- 18. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. Теоретические основы химии угля. М.: Издательство МГУ, 2003. 385 с.
- 19. *Папков В.С., Слонимский Г.Л*. Микротермогравиметрический анализ термодеструкции полимеров // Высокомолекулярные соединения. 1966. Т. 8. № 1. С. 80–87.

- 20. *Букварева О.Ф., Бухаркина Т.В.*, Кинетика и термохимия процессов термодеструкции углеродсодержащих веществ. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. 28 с.
- 21. *Лырщиков С.Ю.*, *Стрижак П.А.*, *Шевырев С.А.* Определение термокинетических параметров разложения углей и отходов их переработки по резуль-
- татам термогравиметрии // Кокс и химия. 2016. № 7. C. 31–38. eLIBRARY ID: 26692664
- 22. Стрижаков Д.А., Юсевич А.И., Юрачка В.В., Кадиев Х.М., Агабеков В.Е., Хаджиев С.Н. Кинетика термолиза смеси гудрона и сосновых опилок // Нефтехимия. 2016. Т. 56. № 5. С. 475–482. https://doi. org/10.7868/S0028242116050178