

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕРМИЧЕСКОГО КРЕКИНГА ПЛАСТИКОВЫХ ОТХОДОВ НА СОСТАВ И ВЫХОД ПРОДУКТОВ

Н.Н. Свириденко, У.А. Фролова, Х.Х. Уразов, Н.С. Сергеев

Никита Николаевич Свириденко (ORCID 0000-0001-5700-8474)\*, Ульяна Александровна Фролова (ORCID 0009-0006-9074-1444), Хошим Хошимович Уразов (ORCID 0000-0002-3613-1040), Никита Сергеевич Сергеев (ORCID 0000-0003-1743-0624)

Лаборатория углеводородов и высокомолекулярных соединений нефти, Институт химии нефти СО РАН, Академический просп. 4, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: nikita26sviridenko@gmail.com\*, ulya.frolova.0202@list.ru, urazovhh@gmail.com, falpa2@yandex.ru

*В данном исследовании был изучен состав продуктов, полученных в результате термического крекинга смеси пластиковых отходов. Смесь включала полиэтилен (низкой и высокой плотности), полипропилен, полистирол и полиэтилентерефталат. Экспериментальные исследования проводили при температурах от 450 до 525 °С и продолжительности крекинга от 1 до 60 мин. Установлено, что при крекинге (температура 450 °С и продолжительность 15 мин) исследуемой смеси пластиковых отходов образуется значительное количество фракций, выкипающих выше 360 °С, и твердых n-алканов. Увеличение продолжительности процесса до 60 мин приводит к активной деструкции твердых n-алканов с образованием более 24% мас. газообразных продуктов. Повышение температуры процесса до 475 °С позволяет снизить продолжительность крекинга с 60 до 5 мин для активной деструкции пластиковых отходов с образованием почти 36% бензиновых и 34% мас. дизельных фракций. Крекинг смеси пластиковых отходов при температуре 500 °С в течение 5 мин позволяет получить жидкий продукт со схожим содержанием светлых фракций, как при 475 °С, но с преобладанием дизельных. Показано, что при максимальной температуре процесса (525 °С) реакции крекинга протекают быстро, на что указывает значительное образование продуктов уплотнения. Установлено, что при крекинге пластиковых отходов в интервале температур 450-500 °С наблюдается преобладание деструктивных процессов. При температуре 525 °С появляются реакции конденсации с образованием фракций 200-360 °С и >360 °С из бензиновых. Показано, что при крекинге данной смеси пластиковых отходов в составе газообразных продуктов в основном образуются: монооксид и диоксид углерода, метан, этан, пропан, n-бутан и n-пентан. Установлено, что для получения большого количества светлых фракций при минимальных выходах побочных продуктов необходимы следующие условия – 475 °С и 5 мин.*

**Ключевые слова:** пластик, отходы, бензин, дизельное топливо, газы, трансформация

## INFLUENCE OF THERMAL CRACKING CONDITIONS OF PLASTIC WASTE ON THE COMPOSITION AND YIELD OF PRODUCTS

N.N. Sviridenko, U.A. Frolova, Kh.Kh. Urazov, N.S. Sergeyev

Nikita N. Sviridenko (ORCID 0000-0001-5700-8474)\*, Ulyana A. Frolova (ORCID 0009-0006-9074-1444), Khoshim Kh. Urazov (ORCID 0000-0002-3613-1040), Nikita S. Sergeyev (ORCID 0000-0003-1743-0624)

Laboratory of Hydrocarbons and High Molecular Oil Compounds, Institute of Petroleum Chemistry of SB of the RAS, Akademicheskii ave., 4, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: nikita26sviridenko@gmail.com\*, ulya.frolova.0202@list.ru, urazovhh@gmail.com, falpa2@yandex.ru

*In this study, the composition of the products resulting from the thermal cracking of a mixture of plastic waste was investigated. The mixture included polyethylene (low and high density), polypropylene, polystyrene, and polyethylene terephthalate. The study was conducted under specific process conditions, with temperatures ranging from 450 to 525 °C and durations ranging*

*from 1 to 60 min. It has been ascertained that during the process of cracking (at a temperature of 450 °C and for a duration of 15 min) of the studied mixture of plastic waste, a considerable amount of fractions with boiling points above 360 °C and solid n-alkanes are formed. It has been demonstrated that increasing the duration of the process to 60 min leads to the active destruction of solid n-alkanes, with the concomitant formation of more than 24% wt. of gaseous products. Conversely, increasing the process temperature to 475 °C allows for the reduction of the cracking duration from 60 to 5 min, thereby facilitating the active destruction of plastic waste and the formation of almost 36% of gasoline and 34% of diesel fractions by weight. The analysis of a mixture of plastic waste subjected to a temperature of 500 °C for a duration of 5 min results in the production of a liquid product that exhibits a content of light fractions analogous to that obtained at 475 °C. However, a predominance of diesel is observed in the liquid product. It has been established that during the process of plastic waste cracking at temperatures ranging from 450 to 500 °C, destructive processes predominate. At a temperature of 525 °C, condensation reactions occur with the formation of fractions of 200-360 °C and >360 °C from gasoline. As demonstrated in the extant research, the during cracking of plastic waste produces a variety of gaseous by products, including carbon monoxide and dioxide, methane, ethane, propane, n-butane, and n-pentane. It has been established that, in order to obtain a large number of light fractions with minimal yields of by-products, the following conditions must be met: 475 °C and 5 min.*

**Keywords:** plastic, waste, gasoline, diesel fuel, gases, transformation

**Для цитирования:**

Свириденко Н.Н., Фролова У.А., Уразов Х.Х., Сергеев Н.С. Влияние условий термического крекинга пластиковых отходов на состав и выход продуктов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 8. С. 112–118. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.13t.

**For citation:**

Sviridenko N.N., Frolova U.A., Urazov Kh.Kh., Sergeyev N.S. Influence of thermal cracking conditions of plastic waste on the composition and yield of products. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 8. P. 112–118. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.13t.

## ВВЕДЕНИЕ

Глобальный масштаб приняла проблема утилизации пластиковых отходов, количество которых неизбежно увеличивается с ростом производства пластмасс. Согласно [1], потребление пластика с 1950 по 2018 г. выросло примерно в 180 раз. Объем произведенного к 2015 г. пластика оценивается в 8,3 млрд. метрических т, из которых около 6,3 млрд. т перешло в отходы [2]. Ожидается, что дальнейшее производство пластика будет расти экспоненциально [3]. Предположительно, уже к 2035 г. масса накопленного пластика превысит количество рыбы в океане [4].

Всего в мире подвергается переработке, по разным оценкам, от 9% до 21% пластмасс. Большая часть пластиковых отходов аккумулируется на мусорных полигонах, представляя серьезную опасность для окружающей среды, а естественное разложение этих отходов может занимать длительное время [5]. Таким образом, современная модель потребления пластика, в частности, подходы к его утилизации, требует серьезной модернизации.

В настоящее время проводятся многочисленные исследования, направленные на разработку

рациональных и экологичных способов утилизации пластика. В литературе [1, 6] приводится, что использование полимеров в качестве сырьевого и энергетического ресурса позволит экономить первичное сырье, а именно, нефть. В частности, в работе [7] отмечается, что пластики производят больше энергии, чем, например, древесина, пищевые и текстильные отходы.

Было изучено несколько стратегий эффективного разложения пластиковых отходов, а также их превращения в ценное топливо и материалы [6, 8]. Наиболее эффективными методами разложения признаны химическая и термическая деградация. Основными проблемами термического крекинга являются высокие энергозатраты, низкая теплопроводность пластмасс и низкое качество продукции [9-11]. Одним из эффективных решений данных проблем является вторичное каталитическое и гидрооблагораживание термолизных масел, получаемых из пластиковых отходов [12-17]. Получаемые при этом продукты облагораживания являются сложной смесью углеводородов с широким интервалом выкипания [18-20]. В ряде работ обсуждается использование термолизных масел для смешивания с различными нефтяными фракциями [21-24]

и их дальнейшая каталитическая или гидротермальная переработка [25-28]. Такой подход позволяет вовлекать в переработку тяжелые нефтяные фракции и перерабатывать их при более мягких условиях [29-30], а также снижать содержание нежелательных компонентов и элементов (азота, сера, хлор и т.д.) [31-32]. Таким образом, целью настоящего исследования является установление влияния условий термокрекинга пластиковых отходов на выход и состав образующихся продуктов.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования использовали смесь полипропилена (PP), полиэтилена низкой (LDPE) и высокой плотности (HDPE), полиэтилентерефталата (PET) и полистирола (PS) в соотношении, представленном в табл. 1.

**Таблица 1**

**Состав смеси пластиковых отходов**

**Table 1. Composition of the plastic waste mixture**

Тип пластика	HDPE	LDPE	PET	PP	PS
Содержание, % мас.	22,8	25,1	12,7	31,6	7,8

Крекинг смеси проводили в автоклаве объемом 12 см<sup>3</sup> при варьировании температуры от 450 до 525 °С и продолжительности эксперимента от 5 до 60 мин при скорости нагрева 40 °С/мин.

Фракционный состав жидких продуктов крекинга определяли на хроматографе «Кристалл-2000М» с пламенно-ионизационным детектором, используя кварцевую капиллярную колонку 25 м×0,22 мм со стационарной фазой SE-54, газ-носитель – гелий. Условия хроматографирования: линейное повышение температуры от 40 до 290 °С, скорость нагрева термостата колонки – 15 °С/мин. Идентификацию углеводородов для разделения отрезков хроматограмм на бензиновую (начало кипения (НК) – 200 °С) и дизельную (200-360 °С) фракции проводили по временам удерживания *n*-алканов с использованием калибровочной смеси C<sub>8</sub>–C<sub>40</sub> SIGMA Aldrich.

Определение углеводородного состава газообразных продуктов крекинга пластиковых отходов проводили с помощью газохроматографического метода на хроматографе "Кристалл-5000" согласно ГОСТ 31371.3-2008. Детектирование водорода, кислорода и азота проводилось на колонке, наполненной молекулярными ситами NaX (фракция 80 – 100 меш., длина колонки 3 м, внутренний диаметр 2 мм). Скорость газа-носителя (аргон) – 30 мл/мин. Разделение углеводородов C<sub>1</sub> – C<sub>6</sub> про-

ведено на колонке, наполненной полимерным сорбентом Rogapak R (фракция 80 – 100 меш., длина колонки 3 м, внутренний диаметр 2 мм). Скорость газа-носителя (гелий) составляла 30 мл/мин.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке представлен выход продуктов крекинга исследуемой смеси пластиков в различных условиях. При температуре крекинга 450 °С и продолжительности 15 мин выход газообразных продуктов составляет 7,8 % масс., увеличение продолжительности процесса до 30 и 60 мин ускоряет реакции крекинга, что приводит к росту выхода газообразных продуктов до 18,4 и 31,9 % масс. соответственно (рисунок а). Крекинг пластиковых отходов при температуре 475 °С и продолжительности от 5 до 30 мин приводит к образованию газообразных продуктов 15,4, 21,0 и 26,5 % масс. соответственно. Увеличение температуры процесса до 500 °С при продолжительности 5 мин незначительно ускоряет газообразование на 2,8 % масс., по сравнению с экспериментами при 475 °С. Однако при продолжительности крекинга 15 мин повышение температуры вызывает значительное ускорение реакций деструкции с образованием газообразных продуктов, выход которых выше на 9,2 % масс. При максимальной температуре процесса (525 °С) реакции крекинга протекают быстрее. Так при продолжительности крекинга 1 мин выход газа составил 22,7 % масс. Дальнейшее увеличение продолжительности приводит к резкому росту выхода газообразных продуктов (почти на 8 % масс.) в интервале 3-5 мин, что указывает на ускорение реакций деструкции.

Увеличение продолжительности крекинга (от 15 до 60 мин) при температуре 450 °С приводит к снижению образования жидких продуктов от 89,2 до 62,7 % масс. в первую очередь за счет газообразования (рисунок б). Выход жидких продуктов при температурах 475 и 500 °С и различной продолжительности варьируется от 82,0 до 66,7 и от 78,8 до 66,1 % масс. соответственно (рисунок б). Выход жидких продуктов при температуре крекинга 525 °С и продолжительности 1 мин составляет 71,8 % масс., а при увеличении продолжительности процесса до 5 мин его величина минимальна и составляет 60,2 % масс. (рисунок б).

При температуре крекинга 450 °С выход продуктов уплотнения (кокса) имеет линейную зависимость и варьируется от 3,0 до 5,4 % масс. при продолжительности крекинга от 15 до 60 мин соответственно (рисунок в). Стоит отметить, что при температуре крекинга 450 °С наблюдается образование ≈ от 3 до 5 % масс. твердых парафинов. При продолжительности крекинга исследуемой смеси

от 5 до 15 мин при температуре 475 °С выход продуктов уплотнения варьируется от 2,6 до 3,4 % масс. соответственно. Однако при 30 мин наблюдается увеличение выхода кокса в 2 раза до 6,4 % масс. При температуре крекинга 500 °С выход кокса возрастает незначительно при увеличении продолжительности от 5 до 15 мин (от 3,0 до 3,7 % масс.) (рис. в). При максимальной температуре процесса (525 °С) реакции крекинга протекают быстрее. Так при продолжительности крекинга 1 мин выход кокса составил 5,5 % масс. Дальнейшее увеличение продолжительности приводит к линейному росту образования продуктов уплотнения (кокса) с 5,5 до 6,2 % масс.

При сравнении результатов крекинга в течение 5 мин и температурах 475, 500 и 525 °С видно, что при переходе от 500 до 525 °С увеличивается выход побочных продуктов (газа и кокса) почти в 2 раза. На основании полученных данных можно сделать заключение, что крекинг данной смеси пластиковых отходов при температуре ниже 475 °С и выше 500 °С неэффективен.

Фракционный состав жидких продуктов крекинга пластиковых отходов в зависимости от условий крекинга представлен в табл. 2. При крекинге пластиковых отходов (450 °С и 15 мин) образуется 67,5 % масс. светлых фракций, из них 31,9 и 35,6 % масс. бензиновых и дизельных фракций. Однако при этом отмечается образование почти 22 % масс. компонентов фракций, выкипающих выше 360 °С (состоящих преимущественно из *n*-алканов). Увеличение продолжительности крекинга ускоряет реакции деструкции по маршруту > 360 °С => 200-360 °С => НК-200 °С => газ. На это указывает незначительное увеличение бензиновых фракций (на 5% масс.) при 30 мин и снижение на

3,6 % масс. при 60 мин, по сравнению с крекингом пластиковых отходов при температуре 450 °С и продолжительности 15 мин. Общее количество топливных фракций (НК-360 °С) снизилось на 12,6% при росте продолжительности крекинга с 15 до 60 мин.

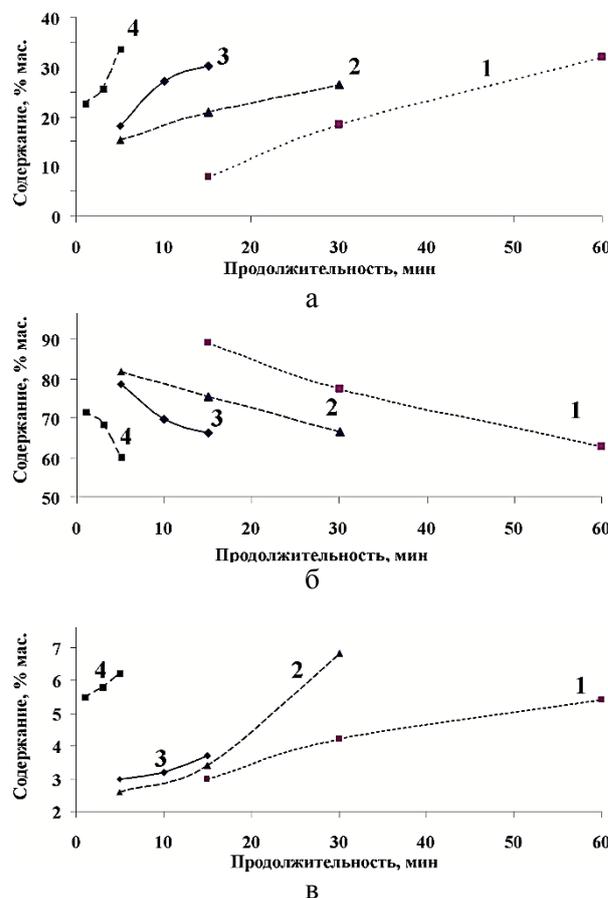


Рис. Содержание а) газа; б) жидкости; в) кокса после крекинга пластиковых отходов при (1) – 450 °С; (2) – 475 °С; (3) – 500 °С; (4) – 525 °С  
Fig. Contents а) gas; б) liquid; в) coke of plastic waste cracking products at (1) – 450 °С; (2) – 475 °С; (3) – 500 °С; (4) – 525 °С

Таблица 2

Анализ жидких продуктов крекинга смеси пластиковых отходов  
Table 2. Analysis of liquid products from cracking of plastic waste mixture

Т, °С	Время процесса, мин	Выход ЖП, % мас.	Содержание, % мас.			
			НК-200 °С	200-360 °С	НК-360 °С	>360 °С
450	15	89,2	31,9	35,6	67,5	21,7
	30	77,4	36,8	28,9	65,7	8,7
	60	62,7	28,3	26,6	54,9	7,8
475	5	82,0	35,7	33,8	69,5	12,5
	15	75,6	33,6	31,7	65,3	10,3
	30	66,7	37,3	23,3	60,6	6,1
500	5	78,8	29,6	38,2	67,8	11,0
	10	69,7	30,5	31,9	62,4	7,3
	15	66,1	34,0	26,6	59,6	6,5
525	1	71,8	41,2	25,6	66,8	5,0
	3	68,5	41,6	20,1	61,7	6,8
	5	60,2	27,4	25,9	53,3	6,9

При температуре крекинга 475 °С и продолжительности 5 мин образуется максимальное количество светлых фракций 69,5 % масс. с незначительным преобладанием бензиновых фракций (НК-200 °С/200-360 °С = 1,06). При увеличении времени крекинга до 15 и 30 мин наблюдается схожая зависимость, описанная для крекинга пластиковых отходов при 450 °С. Содержание компонентов, выкипающих выше 360 °С, снижается с 12,5 до 6,1 % масс., а целевых продуктов (НК-360 °С) на 8,9 % масс.

Крекинг при температуре 500 °С и продолжительности 5, 10 и 15 мин приводит к образованию 67,8, 62,4 и 59,6 % масс. топливных фракций (НК-360 °С) соответственно. При 15 мин крекинга наблюдается значительное преобладание бензиновых фракций над дизельными (НК-200 °С/200-360 °С = 1,28), что указывает на маршрут реакций, описанных выше.

При максимальной температуре крекинга (525 °С) и продолжительности 1 и 3 мин соотношение бензиновых фракций к дизельным составляет 1,61 и 2,07, что является максимальным среди всех экспериментов. Содержание целевых продуктов в этих экспериментах составило 66,8 и 61,7 % масс. При продолжительности 5 мин наблюдается резкая деструкция компонентов бензиновых фракций, вероятно с образованием газообразных продуктов, так и обратная реакция, с образованием компонентов более тяжелых фракций. На это указывает увеличение компонентов фракций, выкипающих в ин-

тервале 200-360 и >360 °С на 5,8 и 0,1 % масс. соответственно.

Состав газообразных продуктов, образующихся при крекинге пластиковых отходов в различных условиях, представлен в табл. 3. Видно, что при температуре крекинга 450 °С и продолжительности 15 мин половину от образовавшихся газообразных продуктов составляют СО+СО<sub>2</sub>. Содержание газов СН<sub>4</sub> и n-C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> составляет 0,96 и 2,60 % масс. соответственно. Образование олефинов и изоалканов невелико и составляет 0,30 % масс. Увеличение продолжительности крекинга в 2 раза (30 мин) ускоряет реакции крекинга, что сказывается на выходе летучих компонентов, содержание которых возросло более чем в 2 раза. Количество газов состава СО+СО<sub>2</sub> увеличивается на 2 % масс., что обусловлено деструкцией компонентов полиэтилентерефталата. Содержание метана увеличилось в 2 раза, тогда как содержание газов состава n-C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub> – более чем в 3 раза. Стоит отметить значительное увеличение олефинов С<sub>2</sub> и С<sub>4</sub> в 2 и 5 раз соответственно. Увеличение данных компонентов обусловлено деструкцией полиэтилена и полипропилена. Содержание изоалканов в составе газообразных продуктов обусловлено деструкцией полипропилена в составе данной смеси. При 450 °С и продолжительности 60 мин наблюдается практически максимальный выход газа – 31,9 % масс. Тенденция увеличения всех компонентов газообразных продуктов сохраняется. Стоит отметить максимальный выход среди всех экспериментов газов состава n-C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub>, i-C<sub>4</sub>-C<sub>5</sub> и олефинов С<sub>4</sub>.

Таблица 3

Анализ газообразных продуктов крекинга смеси пластиковых отходов  
Table 3. Analysis of gaseous products of cracking of plastic waste mixture

Т, °С	Время процесса, мин	Содержание, % мас.							
		Σ	Н <sub>2</sub>	СО+СО <sub>2</sub>	СН <sub>4</sub>	n-C <sub>2</sub> -C <sub>5</sub>	i-C <sub>4</sub> -C <sub>5</sub>	Олефины	
								С <sub>2</sub>	С <sub>4</sub>
450	15	7,8	0,01	3,93	0,96	2,60	0,07	0,10	0,13
	30	18,4	0,03	5,99	2,13	8,95	0,43	0,22	0,66
	60	31,9	0,04	8,52	3,81	16,32	1,25	0,27	1,70
475	5	15,4	0,03	3,40	1,55	9,72	0,25	0,28	0,15
	15	21,0	0,04	7,09	3,26	9,24	0,38	0,28	0,73
	30	26,5	0,04	7,27	3,53	13,68	1,07	0,22	0,69
500	5	18,2	0,04	6,94	3,03	7,21	0,21	0,27	0,49
	10	27,1	0,06	7,63	4,72	12,83	0,56	0,27	1,03
	15	30,2	0,08	8,70	6,56	12,98	0,57	0,27	1,04
525	1	22,7	0,05	4,74	3,16	12,95	0,38	0,50	0,79
	3	25,7	0,09	7,09	4,12	12,62	0,52	0,32	0,93
	5	33,6	0,09	10,53	7,81	13,24	0,57	0,29	1,07

При увеличении температуры процесса отмечается больший выход водорода, CO+CO<sub>2</sub>, олефинов состава C<sub>2</sub> и метана. Максимальные значения данных водорода, CO+CO<sub>2</sub> и метана наблюдаются в эксперименте в условиях 525 °С и продолжительности 5 мин и составляют 0,09, 10,53 и 7,81 % масс. соответственно. Содержание олефинов состава C<sub>2</sub> максимально при данной температуре и продолжительности 1 мин и составляет 0,50%, и с увеличением продолжительности их содержание снижается до 0,29 % масс. Это указывает на протекание реакций деструкции при температуре 500 и 525 °С вновь образованных компонентов легких фракций или газообразных продуктов за счет реакций деметилирования.

#### ВЫВОДЫ

Установлено, что при крекинге исследуемой смеси пластиковых отходов при различных температурах и продолжительностях можно получать жидкие продукты с высоким содержанием бензиновых и дизельных фракций. Определено, что при температуре процесса 475 или 500 °С и продолжительности 5 мин образуется 69,5 и 67,8 % масс. фракций, выкипающих до 360 °С.

На основании выхода побочных продуктов и фракционного состава установлено, что оптимальными условиями крекинга для получения жидких продуктов, обогащенных светлыми фракциями, являются температура 475 °С и продолжительность 5 мин. Выявлено, что выход газообразных продуктов превышает выход продуктов уплотнения в 4-6 раз.

Показано, что при температуре процесса 450 °С и продолжительности 15 мин образуется большое количество высокомолекулярных компонентов, в том числе твердых *n*-алканов (парафинов). Установлено, что при температуре 525 °С реакции крекинга протекают очень быстро, что приводит к образованию до 40 % масс. побочных продуктов.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-73-00058, <https://rscf.ru/project/24-73-00058/>.

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

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 24-73-00058, <https://rscf.ru/project/24-73-00058/>.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Pilapitiya P.G.C.N.T., Ratnayake A.S.** The world of plastic waste: A review. *Clean. Mater.* 2024 V. 11. P. 100220. DOI: 10.1016/j.clema.2024.100220.
2. **Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L.** Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 2017. V. 3. P. 1700782. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.
3. **Rafey A., Siddiqui F.Z.** A review of plastic waste management in India – challenges and opportunities. *Int. J. Environ. Analyt. Chem.* 2023. V. 103. N 16. P. 3971-3987. DOI: 10.1080/03067319.2021.1917560.
4. **Stubbins A., Law K.L., Muñoz S.E., Bianchi T., Zhu L.** Plastics in the Earth system. *Science.* 2021. V. 373. P. 51-55. DOI: 10.1126/science.abb0354.
5. **Dey S., Veerendra G.T.N., Babu P.S.S.A., Manoj A.V.P., Nagarjuna K.** Degradation of Plastics Waste and Its Effects on Biological Ecosystems: A Scientific Analysis and Comprehensive Review. *Biomed. Mater. & Devices.* 2024. V. 2. P. 70–112. DOI: 10.1007/s44174-023-00085-w.
6. **Korai M.S., Mahar R.B., Uqaili M.A.** Optimization of waste to energy routes through biochemical and thermochemical treatment options of municipal solid waste in Hyderabad, Pakistan. *Energy Convers. Manag.* 2016. V. 124. P. 333–343. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.07.032.
7. **Shovon S.M., Akash F.A., Rahman W., Rahman M.A., Chakraborty P., Hossain H.M.Z., Monir M.U.** Strategies of managing solid waste and energy recovery for a developing country – A review. *Heliyon.* 2024. V. 10. N 2. P. 24736. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24736.
8. **Shah J., Jan M.R., Adnan.** Metal decorated montmorillonite as a catalyst for the degradation of polystyrene. *J. oTaiwan Inst. Chem. Eng.* 2017. V. 80. P. 391–398. DOI: 10.1016/j.jtice.2017.07.026.
9. **Свириденко Н.Н., Уразов Х.Х., Сергеев Н.С.** Влияние количества асфальтенов на выход продуктов термического и каталитического крекинга тяжелой нефти Кармальского месторождения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 8. С. 76-84. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.6t.
10. **Свириденко Н.Н., Уразов К.К., Сергеев Н.С.** The effect of asphaltenes quantity on thermal and catalytic cracking product yield of heavy oil from Karmalskoye field. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2024. V. 67. N 8. P. 76-84. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.6t.
11. **Кривцов Е.Б., Гончаров А.В., Свириденко Ю.А., Мерзжигот М.И.** Кинетические закономерности образования и деструкции производных тиофена при термообработке продуктов окисления высокосернистого вакуумного газойля. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 32–41. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.15t.
12. **Кривцов Е.Б., Гончаров А.В., Свириденко Ю.А., Мерзжигот М.И.** Kinetic patterns of formation and destruction of thiophene derivatives during heat treatment of oxidation products of high-sulfur vacuum gas oil. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2023. V. 66. N 11. P. 32–41. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.15t.
13. **Сергеев Н.С., Свириденко Н.Н., Уразов К.К.** Co-cracking of atmospheric residue and plastic waste. *J. Analyt. Appl. Pyrol.* 2024. V. 179. P. 106422. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106422.
14. **Akin O., Varghese R.J., Eschenbacher A., Oenema J., Abbas-Abadi M.S., Stefanidis G.D., Geem K.M.V.** Chemical recycling of plastic waste to monomers: Effect of catalyst contact time, acidity and pore size on olefin recovery in ex-situ

- catalytic pyrolysis of polyolefin waste. *J. Analyt. Appl. Pyrol.* 2023. V. 172. P. 106036. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106036.
13. **Choi I.-H., Lee H.-J., Rhim G.-B., Chun D.-H., Lee K.-H., Hwang K.-R.** Catalytic hydrocracking of heavy wax from pyrolysis of plastic wastes using Pd/H $\beta$  for naphtha-ranged hydrocarbon production. *J. Analyt. Appl. Pyrol.* 2022. V. 161. P. 105424. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105424.
  14. **Chen Z., Erwin B.J., Che L.** Recycling waste polyethylene into fuels over Fe/USY catalyst: Evaluation on the catalytic activities of varied iron states. *Fuel.* 2024. V. 363. P. 131007. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.131007.
  15. **Palos R., Gutiérrez A., Vela F.Ю, Olazar M., Arandes M J., Bilbao J.** Waste Refinery: The Valorization of Waste Plastics and End-of-Life Tires in Refinery Units. A Review. *Energy Fuels.* 2021. V. 35. N 5. P. 3529-3557. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03918.
  16. **Kots P.A., Doika P.A., Vance B.C., Najmi S., Vlachos D.G.** Tuning High-Density Polyethylene Hydrocracking through Mordenite Zeolite Crystal Engineering. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2023. V. 11. N 24. P. 9000-9009. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c01515.
  17. **Palos R., Rodríguez E., Gutiérrez A., Bilbao J., Arandes J.M.** Cracking of plastic pyrolysis oil over FCC equilibrium catalysts to produce fuels: Kinetic modeling. *Fuel.* 2022. V. 316. P. 123341. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123341.
  18. **Klimov O.V., Nadeina K.A., Potapenko O.V., Vatutina Yu.V., Saiko A.V., Koveza V.A., Mukhacheva P.P., Krestyaninova V.S., Yurtaeva A.S., Bogomolova T.S., Salomatina A.A., Gerasimov E.Yu., Prosvirin I.P., Noskov A.S.** Refining of chlorine-containing plastic wastes by traditional hydrotreating and catalytic cracking processes. *Fuel.* 2023. V. 349. P. 128651. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128651.
  19. **Al-Fatesh A.S., AL-Garadi N.Y.A., Osman A.I., Al-Mubaddel F.S., Ibrahim A.A., Khan W.U., Alanazi Y.M., Al-rashed M.M., Alothman O.Y.** From plastic waste pyrolysis to Fuel: Impact of process parameters and material selection on hydrogen production. *Fuel.* 2023. V. 344. P. 128107. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128107.
  20. **Kasar P., Ahmaruzzaman M.** Characterization of liquid products obtained from catalytic binary co-cracking of residual fuel oil with various waste plastics. *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 10987. DOI: 10.1038/s41598-022-15371-8.
  21. **Cai W., Wang X., Zhu Z., Kumar R., Amaniampong P.N., Zhao J., Hu Z.-T.** Synergetic effects in the co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and plastic waste for renewable fuels and chemicals. *Fuel.* 2023. V. 353. P. 129210. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129210.
  22. **Chen G., Cao X., Che Y., Zeng D., Li J., Li S., Zhao J., Yan B.** Synergistic effect on low-pressure pyrolysis of biomass-plastic mixture as representative of Tibetan tourism solid waste. *J. Analyt. Appl. Pyrol.* 2023. V. 175. P. 106181. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106181.
  23. **Tejaswini M.S.S.R., Pathak P.** Co-combustion of multi-layered plastic waste blend with biomass: Thermokinetics and synergistic effect. *Fuel.* 2023. V. 337. P. 127168. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127168.
  24. **Khan M.Z.H., Sultana M., Al-Mamun M.R., Hasan M.R.** Pyrolytic waste plastic oil and its diesel blend: fuel characterization. *J. Environ. Public Health.* 2016. V. 8. P. 1-6. DOI: 10.1155/2016/7869080.
  25. **Hussein Z.A., Shakor Z.M., Alzuhairi M., Al-Sheikh F.** Thermal and catalytic cracking of plastic waste: a review. *Internat. J. Environ. Analyt. Chem.* 2023. V. 103. N 17. P. 5920-5937. DOI: 10.1080/03067319.2021.1946527.
  26. **Sahu R., Song B. J., Im J. S., Jeon Y., Lee C.W.** A review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues. *J. Ind. Eng. Chem.* 2015. V. 27. P. 12-24. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.01.011.
  27. **Munir D., Irfan M.F., Usman M.R.** Hydrocracking of Virgin and Waste Plastics: A Detailed Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. V. 90. P. 490-515. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.01.011.
  28. **Vela F.J., Palos R., Bilbao J., Arandes J.M., Gutiérrez A.** Effect of Co-Feeding HDPE on the Product Distribution in the Hydrocracking of VGO. *Catal. Today.* 2020. V. 353. P. 197-203. DOI: 10.1016/j.cattod.2019.07.010.
  29. **Lingaiah N., Uddin M.A., Muto A., Imai T., Sakata Y.** Removal of organic chlorine compounds by catalytic dehydrochlorination for the refinement of municipal waste plastic derived oil. *Fuel.* 2001. V. 80. P. 1901-1905. DOI: 10.1016/S0016-2361(01)00046-1.
  30. **Pan J., Jiang H., Qing T., Zhang J., Tian K.** Transformation and kinetics of chlorine-containing products during pyrolysis of plastic wastes. *Chemosphere.* 2021. V. 284. P. 131348. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131348.
  31. **Lopez-Urionabarrenechea A., de Marco I., Caballero B.M., Laresgoiti M.F., Adrados A.** Upgrading of chlorinated oils coming from pyrolysis of plastic waste. *Fuel Proc. Technol.* 2015. V. 137. P. 229-239. DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.04.015.
  32. **He W., Sun Y., Shan X.** Organic matter evolution in pyrolysis experiments of oil shale under high pressure: Guidance for in situ conversion of oil shale in the Songliao Basin. *J. Analyt. Appl. Pyrol.* 2021. V. 155. P. 105091. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105091.

Поступила в редакцию 02.12.2024

Принята к опубликованию 25.03.2025

Received 02.12.2024

Accepted 25.03.2025