



## Гидроочистка хлорсодержащего термолизного масла с применением NiMo\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатора

*Т. С. Богомолова<sup>1</sup>✉, В. С. Крестьянинова<sup>1,2</sup>, П. П. Дик<sup>1</sup>, К. А. Надеина<sup>1</sup>,  
П. П. Мухачёва<sup>1</sup>, А. А. Саломатина<sup>1</sup>, Ю. В. Ватутина<sup>1</sup>, О. В. Климов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук», Новосибирск, Россия,  
e-mail: [bts@catalysis.ru](mailto:bts@catalysis.ru)

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию: 20.10.2025 г.; после доработки: 20.11.2025 г.; принята в печать: 21.11.2025 г.

**Аннотация** – Представлены результаты исследования применения бифункционального NiMo\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатора в гидроочистке хлорсодержащего термолизного масла. Показано, что катализатор обладает высокой активностью в реакциях гидрирования и превращения гетероатомных соединений при использовании в качестве добавок к термолизному маслу прямогонного вакуумного газойля и прямогонной дизельной фракции. Используемый катализатор обеспечивает эффективное удаление хлорсодержащих соединений с высокой степенью конверсии, достигающей 95%. Применение NiMo\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатора в процессе гидроочистки смеси термолизного масла и прямогонной дизельной фракции позволяет уменьшить содержание н-алканов и оптимизировать фракционный состав конечного продукта.

**Ключевые слова:** переработка пластиков, термолизное масло, гидроочистка, цеолит Y, NiMo сульфиды.

## Technologies for elimination of chemical hazards

## Hydrotreating of chlorine-containing thermolysis oil using NiMo\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY catalyst

*Tatyana S. Bogomolova<sup>1</sup>✉, Valeriya S. Krestyaninova<sup>1,2</sup>, Pavel P. Dik<sup>1</sup>, Kseniya A. Nadeina<sup>1</sup>, Polina P. Mukhacheva<sup>1</sup>, Anna A. Salomatina<sup>1</sup>, Yulia V. Vatutina<sup>1</sup>, and Oleg V. Klimov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal Research Center Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, e-mail: [kvs@catalysis.ru](mailto:kvs@catalysis.ru)

<sup>2</sup>N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Received: October 20, 2025; Revised: November 20, 2025; Accepted: November 21, 2025

**Abstract** – The results of a study on the use of a bifunctional NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY catalyst in the hydrotreating of chlorine-containing thermolysis oil are presented. It is shown that when using two different solvents (straight-run vacuum gas oil and straight-run diesel fraction) as feedstock, the catalyst exhibits high activity in hydrogenation reactions and the conversion of heteroatomic compounds. The catalyst enables the removal of chlorine-containing compounds with a high degree of conversion (approximately 95%). Using the NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY catalyst in the hydrotreating of a mixture of thermolysis oil and straight-run diesel fraction reduces the content of *n*-alkanes and lightens the fractional composition of the resulting product.

*Keywords:* plastic waste recycling, thermolysis oil, hydrotreating, zeolite Y, NiMo sulfides.

## ВВЕДЕНИЕ

Последние несколько десятилетий ознаменовались для химической промышленности значительным ростом производства термопластов, таких как: полиэтилен, полипропилен, полистирол, полиэтилентерефталат и поливинилхлорид. Стремительное развитие индустрии пластмасс, а также отсутствие организованных методов утилизации и организации пластиковых отходов привело к серьезным экологическим проблемам. Неспособность пластмасс к биодegradации, а также использование не возобновляемых нефтяных ресурсов для их изготовления подтверждают актуальность развития технологий переработки пластиковых отходов, позволяющих получать из них ценные углеводородные продукты [1].

В ближайшие годы основным способом переработки пластиковых отходов станет химическая переработка, в частности, популярность набирает термолиз пластиков с целью получения продуктов, которые в дальнейшем могут быть использованы либо для синтеза олефинов и ароматических соединений в нефтехимической промышленности, либо для использования в качестве сырья в процессах нефтепереработки [2]. Термолиз – это эндотермический процесс термического разложения без контакта с воздухом. Основным продуктом термолиза является термолизное масло (ТМ), характеризующееся широким интервалом температур кипения и содержащее в своём составе соединения галогенов, серы, азота и кислорода. Одной из самых актуальных задач является изучение возможности вовлечения хлорсодержащих ТМ в процессы нефтепереработки. Наличие хлора может приводить к коррозии оборудования, затруднять транспортировку жидких продуктов и приводить к дезактивации катализаторов различных процессов нефтепереработки. Поэтому необходимо разработать способы удаления хлорсодержащих соединений на этапе гидрогенизационной переработки ТМ.

Согласно нашим предыдущим исследованиям ТМ, полученное из смеси пластиков с высоким содержанием поливинилхлорида, характеризуется широким интервалом температуры кипения 50–600°C и, в основном состоит из фракций, выкипающих при температурах выше 180°C. Вовлечение такого ТМ в

гидроочистку совместно с вакуумным газойлем, несмотря на значительные концентрации хлора в исходном сырье приводит к существенному снижению содержания гетероатомных соединений и увеличению доли *n*-алканов. Полученные гидроочищенные продукты могут быть вовлечены в процессы каталитического крекинга и депарафинизации [3–5]. Перспективные результаты ранних работ послужили стимулом к изучению возможности применения цеолитсодержащих катализаторов, способных в процессе гидроочистки к частичному гидрокрекингу образующихся высококипящих *n*-алканов, а также к исследованию влияния природы растворителя на эффективность таких катализаторов в гидроочистке хлорсодержащего термолизного масла.

Целью данной работы было исследование применения катализатора, содержащего цеолит Y в гидроочистке сырья, полученного путем смешения хлорсодержащего термолизного масла с прямогонной дизельной фракцией (ПДФ) и прямогонным вакуумным газойлем (ВГО).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Приготовление носителя и катализатора

Для приготовления носителя был выбран ультрастабильный трехмерный цеолит Y (USY) с мольным соотношением Si/Al = 40 (CBV-780, Zeolyst Inc.). В качестве связующего был использован псевдобемит, синтезированный по технологии термической активации гиббсита (ИК СО РАН). Гранулы носителя были получены в форме трилистника путем экструзии формовочной пасты, приготовленной из порошков цеолита и псевдобемита с использованием раствора HNO<sub>3</sub> в качестве пептизирующего агента. Термообработка полученных гранул включала стадии сушки при 120°C и прокаливания при 550°C в токе воздуха. Приготовленный носитель содержал 25% масс. цеолита Y.

Приготовление катализатора NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY осуществляли методом вакуумной пропитки носителя раствором, содержащим соли предшественников активного NiMo компонента, а также лимонную и фосфорную кислоты. Далее осуществляли термообработку при 120°C в течение 12 ч с получением катализатора, содержащего 2,6% масс. Ni, 12,9% масс. Mo и 2,6% масс. P. Расчетные содержания элементов и концентрации Ni, Mo, P, определенные методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, показали хорошее согласование между собой. Текстульные характеристики цеолита Y, носителя и катализатора, представленные в таблице 1 определяли методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота при –196°C на установке ASAP 2010 (Micromeritics Corp.).

**Таблица 1.** Текстульные характеристики цеолита Y, носителя и катализатора

**Table 1.** Textural characteristics of zeolite Y, support and catalyst

Образец	S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /г	V <sub>пор</sub> , см <sup>3</sup> /г	V <sub>микро</sub> , см <sup>3</sup> /г
Цеолит Y (USY)	884	0,47	0,230
Носитель Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -USY	293	0,54	0,039
Катализатор NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -USY	213	0,29	0,037

## 2. Приготовление термолизного масла

Термолизное масло было наработано на лабораторной установке периодического действия путем термолиза смеси пластмасс в токе азота в интервале температур от комнатной до 510°C. В качестве исходных пластмасс были использованы:

- 54% масс. – полиэтилен низкого давления высокой плотности 277–73 ООО «Ставролен»;
- 22% масс. – поливинилхлорид суспензионный SG-5;
- 13% масс. – полистирол общего назначения марка 525 ОАО «Нижекамскнефтехим»;
- 11% масс. – полипропилен 01270 ОАО «Уфаоргсинтез».

Доли используемых полимеров обусловлены литературными данными о соотношении этих пластиков, содержащихся в составе российских твёрдых коммунальных отходов [6]. Характеристики синтезированного ТМ представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Характеристики синтезированного термолизного масла

**Table 2.** Characteristics of synthesized thermolysis oils

Параметры	ТМ
Содержание хлора, ppm	2350
Содержание серы, ppm	<0,01
Содержание азота, ppm	<0,01
<i>n</i> -алканы, % масс.	46,0
<i>изо</i> -алканы, % масс	17,7
Алкены, % масс	31,6
Алкадиены, % масс	4,2
МАУ <sup>1</sup> , % масс	14,4
Д <sup>+</sup> АУ <sup>2</sup> , % масс	2,7

<sup>1</sup> – моноароматические углеводороды;

<sup>2</sup> – полиароматические углеводороды.

В дальнейших каталитических испытаниях использовали смесь ТМ с прямогонной дизельной фракцией (Сырье ПДФ) и смесь ТМ с прямогонным вакуумным газойлем (Сырье ВГО). Смесевое сырье гидроочистки с прямогонной дизельной фракцией содержало 70% масс. ТМ и 30% масс. ПДФ, сырье гидроочистки с прямогонным вакуумным газойлем содержало 80% масс. ТМ и 20% масс. ВГО. Соотношение компонентов смесевое сырьё было выбрано исходя из максимального вовлечения термолизного масла с условием получения сырьё, которое можно прокачивать по технологическим линиям установки при их обогреве не выше 80°C.

## 3. Тестирование катализатора

Тестирование катализатора проводили в проточном трубчатом реакторе при следующих условиях:  $P = 5,0$  МПа,  $T = 340, 350, 360^\circ\text{C}$ , объемная скорость подачи сырьё =  $0,6 \text{ ч}^{-1}$ , отношение  $\text{H}_2/\text{сырьё} = 1000 \text{ Нм}^3/\text{м}^3$ . Непосредственно перед испытанием катализаторы подвергали двухстадийному жидкофазному сульфидированию, после чего в реактор подавали смесевое сырьё и задавали

рабочие параметры процесса. Для достижения стационарного состояния катализатор выдерживали не менее 40 часов после установления параметров процесса.

#### **4. Определение содержания серы и азота**

Содержание серы и азота в исходном сырье и продуктах гидроочистки определяли методом окислительного сжигания на элементном анализаторе нефтепродуктов «Trace Elemental Instrument Xplorer NS» по методикам ASTM D4629 и ASTM D5762, соответственно.

#### **5. Определение углеводородного состава**

Определение углеводородного состава образцов проводили методом двумерной газовой хроматографии. Эксперименты проводили с использованием газового хроматографа GC 7890B (Agilent Technologies, USA) оборудованного CFT модулятором (Agilent Technologies, USA), автоматическим пробоотборником жидкостей Agilent 7693A (Agilent Technologies, USA) и пламенно-ионизационным детектором (380°C, 50Гц). Условия анализа: неполярная колонка первого измерения – VF-5ht UltiMetal, колонка второго измерения средней полярности – DB-17HT, (50% фенил)-метилсилоксан, Agilent Technologies.

#### **6. Определение фракционного состава**

Распределение интервалов кипения образцов определяли по методике ASTM D7213. Исследования проводились на газовом хроматографе Agilent 7890B с пламенно-ионизационным детектором методом имитированной дистилляции. Образцы предварительно разбавляли сероуглеродом для снижения вязкости.

#### **7. Определение содержания хлора**

Содержание хлора в образцах определяли по ГОСТ 57033-2016 «Определение следовых количеств хлоридов, фторидов и бромидов методом ионной хроматографии со сжиганием образца» на ионном хроматографе Thermo Scientific Dionex Integrion с системой сжигания проб MultiTek.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Физико-химические характеристики исходного сырья и продуктов гидроочистки представлены в таблице 3. Согласно полученным данным смесевое сырье ВГО характеризуется большей концентрацией серы и азота, а также ароматических углеводородов, в сравнении с сырьем ПДФ. Содержание хлора в обоих видах сырья сопоставимо.

Результаты исследования продуктов гидроочистки показали, что NiMo\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатор вне зависимости от используемого вида сырья проявляет высокую активность в превращении гетероатомных соединений. Конверсия соединений составила:

- серосодержащих 95–99%,
- азотсодержащих – 87–88%,
- хлорсодержащих – 95–98%.

**Таблица 3. Таблица 3.** Физико-химические характеристики сырья и продуктов гидроочистки  
**Table 3.** Physicochemical characteristics of feedstock and hydrotreating products

Показатель	Сырье ВГО	NiMo\Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -USY- ВГО		Сырье ПДФ	NiMo\Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - USY-ПДФ	
		350°C	360°C		340°C	350°C
Содержание N, ppm	312	40	40	45	5	5
Содержание S, ppm	4844	145	203	1219	11	11
Содержание Cl, ppm	1800	78	55	1675	30	8
Алкены, % масс.	19,5	4,8	2,8	19,6	<0,01	<0,01
Алкадиены, % масс.	3,9	<0,01	<0,01	2,8	<0,01	<0,01
МАУ, % масс.	15,2	13,8	13,9	11,2	8,4	8,9
Д <sup>+</sup> АУ, % масс.	3,4	0,8	1,0	1,5	0,3	1,0

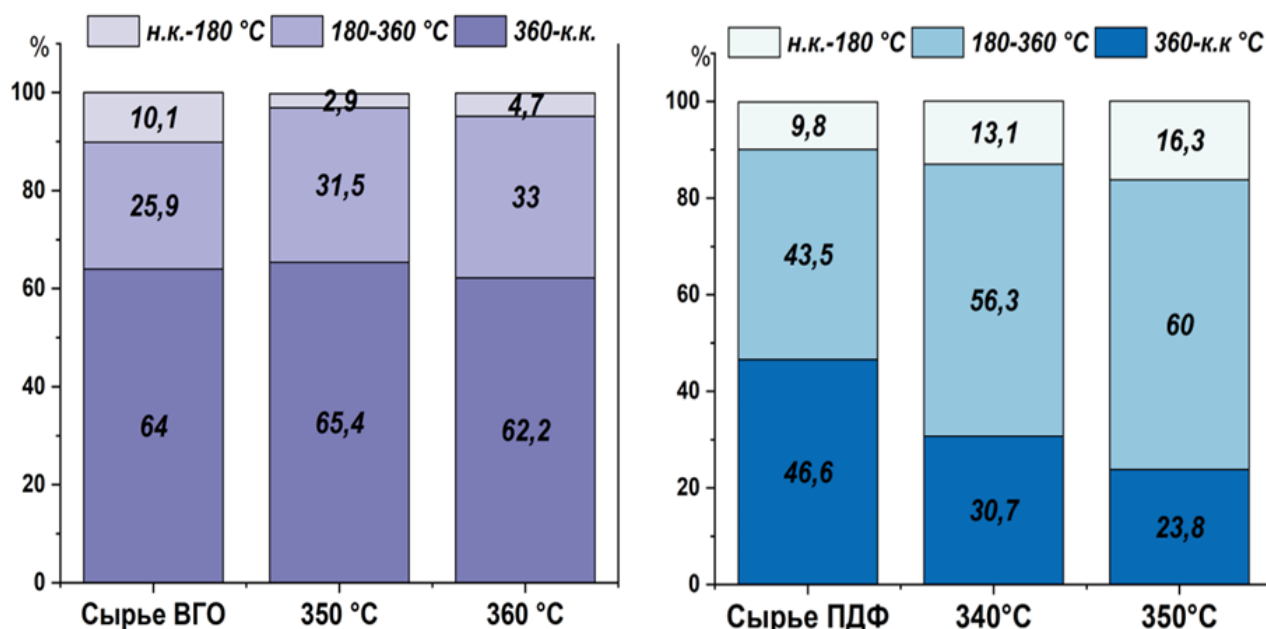
При этом более высокая активность NiMo\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатора в целевых реакциях гидроочистки в процессе превращения сырья ПДФ выше при аналогичной или даже меньшей температуре процесса в сравнении с сырьем ВГО. Так как само по себе термолитное масло не содержит соединений серы и азота (табл. 1), их наличие в сырье обусловлено лишь видом используемого нефтепродукта и, соответственно более тяжелый фракционный состав вакуумного газойля предполагает более труднопревращаемые серо- и азотсодержащие соединения в сравнении с дизельной фракцией.

При повышении температуры процесса в случае сырья ПДФ остаточные содержания серы и азота не изменились, но заметно снизилось содержание хлора в полученном продукте. В случае сырья ВГО повышение температуры процесса привело к повышению остаточного содержания серы, концентрация азота при этом не изменилась, но содержание хлора снизилось. Согласно литературным данным [6, 7] протекающие на сульфидных катализаторах реакции гидродехлорирования, гидрообессеривания и гидродеазотирования имеют схожий механизм с участием одних и тех же активных центров сульфидного компонента, с образованием соответствующих углеводородов и летучих соединений (сероводород, хлороводород и аммиак). При этом в ряде работ по исследованию конкурентности протекающих реакций показано, что для сульфидных NiMo катализаторов активность в реакции гидродехлорирования выше в сравнении с гидрообессериванием [8–12].

Синтезированный NiMo\Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатор также проявил высокую активность в реакциях гидрирования как для сырья ПДФ, так и для сырья ВГО. Согласно исследованию углеводородного состава продуктов гидроочистки сырья ВГО (табл. 3) присутствующие алкадиены подвергаются полному превращению, а доля алкенов снижается более чем в 4 раза. Кроме того, в продуктах гидроочистки наблюдается снижение содержания ароматических углеводородов. Для продуктов гидроочистки сырья ПДФ и вовсе наблюдается полное гидрирование ненасыщенных соединений, а также частичное гидрирование ароматических углеводородов (табл. 3).

Применение цеолитсодержащего  $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-USY}$  катализатора в процессе гидроочистки предполагает помимо протекания целевых реакций гидроочистки протекание реакций изомеризации и крекинга, оказывающих влияние на фракционный состав получаемого продукта. Поскольку отличительной характеристикой термолизного масла является широкий фракционный состав (табл. 1), смесевое сырье гидроочистки также обладает весьма широкими интервалами кипения ( $50\text{--}600^\circ\text{C}$ ) и в основном состоит из дизельной фракции (интервал кипения:  $180\text{--}360^\circ\text{C}$ ) и остатка (интервал кипения:  $360^\circ\text{C}\text{-к.к.}$ ).

Результаты исследования фракционного состава, приведенные на рисунке 1, демонстрируют наибольшие изменения фракционного состава сырья ПДФ в ходе проведения процесса. Полученные продукты характеризуются более высоким содержанием светлых фракций (н.к.- $360^\circ\text{C}$ ) и сниженной долей фракции  $360^\circ\text{C}\text{-к.к.}$ , что свидетельствует об успешном протекании реакций крекинга в ходе гидроочистки. Для продуктов гидроочистки сырья ВГО значительных изменений содержания фракции  $360^\circ\text{C}\text{-к.к.}$  не наблюдается, что вероятно связано с осложнением протекания реакций крекинга из-за высокого содержания гетероатомных соединений в составе сырья. Поскольку содержание активного компонента в катализаторе остается неизменным, более высокие концентрации серо- и азотсодержащих соединений в сырье ВГО, в сравнении с сырьем ПДФ, способны ингибировать реакции гидро/дегидрирования необходимые для протекания реакций крекинга.



**Рис. 1.** Фракционный состав сырья и полученных продуктов гидроочистки.

**Fig. 1.** Fractional composition of feedstock and hydrotreating products.

Протекание реакций крекинга в ходе проведения процесса гидроочистки сырья ПДФ также подтверждается данными углеводородного состава полученных продуктов (табл. 4). Представленные данные демонстрируют снижение общего содержания *n*-алканов, сопровождающиеся повышением

содержания *изо*-алканов в составе продуктов гидроочистки сырья ПДФ. Причем расчет соотношения между *изо*-алканами, содержащимися в дизельной фракции и остатке показали, что получаемые *изо*-алканы преимущественно находятся в дизельной фракции, что хорошо согласуется с данным фракционного состава.

В случае гидроочистки сырья ВГО напротив наблюдается увеличение содержания *н*-алканов в продуктах, с сохранением соотношения *изо*-алканов к нормальным, а соотношение *изо*-алканов в дизельной фракции и остатке близко к исходному сырью. Таким образом, можно предположить, что более сложный и тяжелый состав сырья ВГО препятствует протеканию реакций гидрокрекинга в ходе гидроочистки с применением NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатора.

**Таблица 4.** Содержание алканов в сырье и продуктах гидроочистки

**Table 4.** Alkanes content in feedstock and hydrotreating products

Параметр	Сырье ВГО		NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -USY-ВГО		NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -USY-ВГО	
			350°C		360°C	
	<i>н</i>	<i>изо</i>	<i>н</i>	<i>изо</i>	<i>н</i>	<i>изо</i>
Общее содержание, % масс.	34,1	20,2	45,7	26,8	45,7	25,8
Соотношение <i>изо</i> -алканы/ <i>н</i> -алканы	0,6		0,6		0,6	
Соотношение <i>изо</i> -алканов ДФ/остатка	0,2		0,4		0,4	
Параметр	Сырье ПДФ		NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -USY-ПДФ		NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -USY-ПДФ	
			340°C		350°C	
	<i>н</i>	<i>изо</i>	<i>н</i>	<i>изо</i>	<i>н</i>	<i>изо</i>
Общее содержание, % масс.	42,9	20,1	34,8	48,6	32,8	51,3
Соотношение <i>изо</i> -алканы/ <i>н</i> -алканы	0,5		1,4		1,6	
Соотношение <i>изо</i> -алканов ДФ/остатка	0,9		1,2		1,6	

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование применения бифункционального NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатора в гидроочистке хлорсодержащего термолизного масла показало, что вне зависимости от используемого сырья катализатор характеризуется высокой активностью в реакциях гидрирования и превращении гетероатомных соединений. Конверсия хлорсодержащих соединений превысила 95%. При этом в случае смесового сырья, содержащего ПДФ, применение бифункционального NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-USY катализатора позволяет в ходе гидроочистки снизить содержание *н*-алканов и облегчить фракционный состав получаемого продукта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0037).*

### ACKNOWLEDGEMENT

*The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the governmental assignment for Boreskov Institute of Catalysis (project FWUR-2024-0037).*

### **КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### **CONFLICT OF INTERESTS:**

*The authors declare no conflict of interests.*

### **Список литературы:**

1. Singh R.K., Kumar R., Ruj B. (2015). Plasticwaste management and disposal techniques-Indian scenario. *International Journal of Plastics Technology*, 19(2), 211–226. <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9120-5>.
2. Young, I. (2021). *Sabir, Plastic Energy to start building plant in Netherlands for chemical recycling of plastics*.
3. Klimov, O. V., Nadeina, K. A., Potapenko, O. V., Vatutina, Y. V., Saiko, A. V., Koveza, V. A., Noskov, A. S. (2023) Refining of chlorine-containing plastic wastes by traditional hydrotreating and catalytic cracking processes. *Fuel*, 349, 128651:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128651>.
4. Климов О.В., Надеина К.А., Сайко А.В., Крестьянинова В.С., Ватутина Ю.В., Богомолова Т.С., Саломатина А.А., Долгушев П.А. (2023). Изучение свойств продуктов гидроконверсии термолитного масла, получаемого из отходов смесевых пластиков. *Экология и промышленность России*, 27(2), 15–21.
5. Богомолова Т.С., Смирнова М.Ю., Надеина К.А., Саломатина А.А., Крестьянинова В.С., Ватутина Ю.В., Мухачева П.П., Климов О.В. (2025). Переработка смесевых отходов пластика с получением низкосажающего дизельного топлива. *Экология и промышленность России*, 29(2), 30–36. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-30-36>.
6. Longzhen Ding, Pengpeng Zhang, Hong Luo, Yongfeng Hu, Mohammad Norouzi Banis, Xiaoling Yuan, Na Liu (2018). Nitrogen-doped carbon materials as metal-free catalyst for the dechlorination of trichloroethylene by sulfide. *Environmental Science and Technologies*, 52(24), 14286–14293. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03565>.
7. Yang Y., Wang L., Ding L., Qu D., Zhang Yu., Han Q., Liu N. (2020). Catalytic performance and mechanism of biochars for dechlorination of tetrachloroethylene in sulfide aqueous solution. *Applied Catalysis B: Environmental*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119285>.
8. Frimmel J., Zdražil M. (1997). Comparative study of activity and selectivity of transition metal sulfides in parallel hydrodechlorination of dichlorobenzene and hydrodesulfurization of methylthiophene. *Journal of Catalysis*, 167(1), 286–295. <https://doi.org/10.1006/jcat.1997.1566>.
9. Frimmel J., Zdražil M. (1995). Hydrogenolysis of organochlorinated pollutants: Parallel hydrodesulfurization of methylthiophene and hydrodechlorination of dichlorobenzene over carbon-supported nickel, molybdenum and nickel-molybdenum sulfide catalysts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 63(1), 17–24. <https://doi.org/10.1002/jctb.280630103>.
10. Weber T., Prins R., van Santen R.A. (1998). Transition metal sulphides: chemistry and catalysis. *Springer Science & Business Media*, 60.
11. Gioia F., Murena F. (1998). Simultaneous catalytic hydroprocessing of chlorine-, nitrogen-, and sulphur-containing aromatic compounds. *Journal Hazardous Materials*, 57(1–3), 177–192. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00082-4).

12. Murena F. (2000). Catalytic hydroprocessing of chlorobenzene: the effect of thiophene. *Journal Hazardous Materials*, 75(1), 49–56. [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(00\)00158-8](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(00)00158-8).

## References:

1. Singh R.K., Kumar R., & Ruj B. (2015). Plasticwaste management and disposal techniques- Indian scenario. *International Journal of Plastics Technology*, 19(2), 211–226. <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9120-5>.
2. Young, I. (2021). *Sabic, Plastic Energy to start building plant in Netherlands for chemical recycling of plastics*.
3. Klimov, O.V., Nadeina, K.A., Potapenko, O.V., Vatutina, Y.V., Saiko, A.V., Koveza, V.A., & Noskov, A. S. (2023). Refining of chlorine-containing plastic wastes by traditional hydrotreating and catalytic cracking processes. *Fuel*, 349, 128651:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128651>.
4. Klimov O.V., Nadeina K.A., Saiko A.V., Krestyaninova V.S., Vatutina Yu.V., Bogomolova T.S., Salomatina A.A., & Dolgushev P.A. (2023). Study of the properties of hydroconversion products of thermolysis oil obtained from waste mixed plastics. *Ecology and Industry of Russia*, 27(2), 15–21. (in Russ.).
5. Bogomolova T.S., Smirnova M.Yu., Nadeina K.A., Salomatina A.A., Krestyaninova V.S., Vatutina Yu.V., Mukhacheva P.P., & Klimov O.V. (2025). Processing of mixed plastic waste to produce low-freezing diesel fuel. *Ecology and Industry of Russia*, 29(2), 30–36. (in Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-30-36>.
6. Longzhen Ding, Pengpeng Zhang, Hong Luo, Yongfeng Hu, Mohammad Norouzi Banis, Xiaoling Yuan, & Na Liu (2018). Nitrogen-doped carbon materials as metal-free catalyst for the dechlorination of trichloroethylene by sulfide. *Environmental Science and Technologies*, 52(24), 14286–14293. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03565>.
7. Yang Y., Wang L., Ding L., Qu D., Zhang Yu., Han Q., & Liu N. (2020). Catalytic performance and mechanism of biochars for dechlorination of tetrachloroethylene in sulfide aqueous solution. *Applied Catalysis B: Environmental*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119285>.
8. Frimmel J., & Zdražil M. (1997). Comparative study of activity and selectivity of transition metal sulfides in parallel hydrodechlorination of dichlorobenzene and hydrodesulfurization of methylthiophene. *Journal of Catalysis*, 167(1), 286–295. <https://doi.org/10.1006/jcat.1997.1566>.
9. Frimmel J., Zdražil M. (1995). Hydrogenolysis of organochlorinated pollutants: Parallel hydrodesulfurization of methylthiophene and hydrodechlorination of dichlorobenzene over carbon-supported nickel, molybdenum and nickel-molybdenum sulfide catalysts. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 63(1), 17–24. <https://doi.org/10.1002/jctb.280630103>
10. Weber T., Prins R., van Santen R.A. (1998). Transition metal sulphides: chemistry and catalysis. *Springer Science & Business Media*, 60.
11. Gioia F., Murena F. (1998). Simultaneous catalytic hydroprocessing of chlorine-, nitrogen-, and sulphur-containing aromatic compounds. *Journal Hazardous Materials*, 57(1-3), 177–192. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00082-4).
12. Murena F. (2000). Catalytic hydroprocessing of chlorobenzene: the effect of thiophene. *Journal Hazardous Materials*, 75(1), 49–56. [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(00\)00158-8](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(00)00158-8).