



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 272–279

Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 272–279

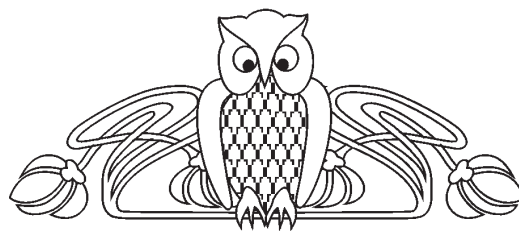
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-272-279>, EDN: XVTDKC

Научная статья

УДК 544.478.13

Исследование активности бифункциональных катализаторов на превращение *n*-гексана



И. В. Внук, Е. А. Ашихмин, С. Б. Ромаденкина , Т. В. Аниськова

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Внук Илья Владиславович, магистрант Института химии, ilia_vnukov1999@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8866-6370>

Ашихмин Егор Александрович, магистрант Института химии, ashikhmin.yegor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8317-6110>

Ромаденкина Светлана Борисовна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры нефтехимии и техногенной безопасности, romadenkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7035-7193>

Аниськова Татьяна Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры нефтехимии и техногенной безопасности, aniskovatv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1988-323X>

Аннотация. Получение различных моторных топлив осуществляют посредством переработки светлых фракций нефти, с температурой начала кипения до 350°C. Нынешняя тенденция показывает утяжеление нефти на новых месторождениях. Новые залежи нефти находятся глубже большей долей темных фракций с температурой кипения от 350°C. Данная ситуация ведет к поиску решений по увеличению глубины переработки светлых фракций для получения целевых продуктов. Одним из основных путей решения поставленной задачи является создание новых или модернизация существующих каталитических систем. Моторные топлива должны соответствовать необходимым эксплуатационным и экологическим характеристикам, что определяется их химическим составом. Исследованы бифункциональные катализаторы на превращение *n*-гексана. В качестве носителя использован высокомолекулярный цеолит ЦВМ (ZSM-5), который обладает бифункциональностью из-за наличия разных активных центров. На носитель была нанесена платина (Pt/ЦВМ), празеодим (Pr/ЦВМ), а также последовательно нанесены празеодим и платина (Pt,Pr/ЦВМ) методом пропитки. В качестве сырья использовался нормальный гексан. Выбор данного сырья связан со способностью к реакции ароматизации, а также присутствием *n*-гексана в сырье в процессе получения моторных топлив – каталитическом риформинге. В результате превращения сырья получено жидкое топливо многокомпонентного состава с количеством углеродных атомов в цепи от 3 до 14, а также газы, содержащие углеводороды C₁ – C₅. При превращении *n*-гексана на исследуемых катализаторах с увеличением температуры растет и октановое число и содержание ароматических углеводородов. Установлено, что при проведении процесса при температуре 450°C наибольший выход катализата составляет (33,8 масс. %) на катализаторе Pt,Pr/ЦВМ. С ростом температуры повышается выход бензола. Минимальный выход бензола (0,6 масс. %) при 450°C отмечается у биметаллического катализатора, что соответствует стандарту автобензина ЕВРО-5. Наибольшая степень наблюдалась в ходе превращения *n*-гексана на каталитической системе Pt,Pr/ЦВМ при температуре 450 °C (97%).

Ключевые слова: *n*-гексан, превращения, каталитический риформинг, платина, празеодим, биметаллические катализаторы

Для цитирования: Внук И. В., Ашихмин Е. А., Ромаденкина С. Б., Аниськова Т. В. Исследование активности бифункциональных катализаторов на превращение *n*-гексана // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 272–279. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-272-279>, EDN: XVTDKC

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Study of the activity of bifunctional catalyzers on the transformation of *n*-hexane

I. V. Vnukov, E. A. Ashikhmin, S. B. Romadenkina , T. V. Aniskova

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Ilya V. Vnukov, ilia_vnukov1999@mail.ru

Egor A. Ashikhmin, ashikhmin.yegor@mail.ru

Svetlana B. Romadenkina, romadenkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7035-7193>

Tatiana V. Aniskova, aniskovatv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1988-323X>

Abstract. The production of various motor fuels is carried out by processing light fractions of oil with an initial temperature of boiling to 350°C. The current trend shows that oil in new fields has more weight than before. New oil reservoirs are deeper with a greater proportion of dark fraction



with a boiling point of 350°C. This situation stimulates to find new ways of increasing the processing depth light fractions for synthesis target product. One of the main solution path for the problem is creation of new catalytic systems or modernization of existing ones. Motor fuels must meet the necessary operational and environmental characteristics, which is determined by their chemical composition. This article is devoted to the study of bifunctional catalyzers for the conversion of n-hexane. High molecular zeolite CVM (ZSM-5) was used as a carrier, which has functionality due to the presence of various active centers. Platinum (Pt/CVM), praseodymium (Pr/CVM) were also applied to the carrier, and praseodymium and platinum (Pt,Pr/CVM) were successively applied by impregnation. Normal hexane was used as a raw material. The choice of this raw material is associated with the ability to aromatization reaction, as well as the presence of n-hexane in the raw materials of the process of obtaining motor fuels-catalytic reforming. As a result of the transformation of raw materials, liquid fuel of multicomponent composition with the number of carbon atoms in the chain from 3 to 14, as well as gases containing C1 – C5 hydrocarbons, was obtained. When n-hexane is converted on the catalyzers under study, both the octane number and the content of aromatic hydrocarbons increase with increasing temperature. It has been found that when the process is carried out at a temperature of 450°C, the highest yield of the catalysate is (33.8% by weight.) on a Pt,Pr/CVM catalyzer. With an increase in temperature, the yield of benzene increases. Minimum benzene yield (0.6 wt. %) is achieved at 450°C marked by a bimetallic catalyzer, which corresponds to the EURO-5 gasoline standard. The highest degree of conversion was observed during the conversion of n-hexane on the Pt,Pr/CMC catalytic system at a temperature of 450° C, which was (97%).

Keywords: n-hexane, transformations, catalytic reforming, platinum, praseodymium, bimetallic catalyzers

For citation: Vnukov I. V., Ashikhmin E. A., Romadenkina S. B., Aniskova T. V. Study of the activity of bifunctional catalyzers on the transformation of n-hexane. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 272–279 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-272-279>, EDN: XVTDKC

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

На сегодняшний день большой вклад в производство современных моторных топлив вносит процесс каталитического риформинга. В промышленности используют катализаторы, на носитель которых нанесены благородные металлы, отличающиеся особой чувствительностью к воздействию каталитических ядов и воды, при этом очень дорогие. Поэтому актуальной задачей остается разработка эффективных каталитических систем с отсутствием этой группы или минимальным содержанием благородных металлов [1–3].

Первыми были введены в эксплуатацию монометаллические катализаторы с содержанием платины до 0,8 масс. %, что стало причиной больших экономических затрат. Введение второго металла на носитель приводит к увеличению межрегенерационного периода и уменьшению затрат в связи с уменьшением количества наносимого благородного металла. Основным металлом, также как и в монометаллическом катализаторе, являлась платина, которая увеличивала скорость реакцией гидрирования и дегидрирования. В качестве второго металла были нанесены рений, олово или иридий [4, 5].

В настоящее время в промышленности используются катализаторы различного состава, такие как ПР-81 (содержание платины 0,3 масс. %, рения 0,3 масс. %), R-254 (содержание платины 0,3 масс. %, рения 1,0 масс. %), РФ-1 (содержание платины 0,25 масс. %, рения 0,4 масс. %) и др.

Широкое распространение за счет большой удельной поверхности получили γ - Al_2O_3 . По-

средством модификации свойств можно повысить селективность, активность и стабильность катализатора [5–7].

Особенностью цеолитных катализаторов является их бифункциональность. Благодаря этой особенности отдельные стадии одной реакции каталитического риформинга, в присутствии катализатора на основе цеолитов, протекают на металлических и кислотных центрах [8]. Металлические центры увеличивают скорость реакции дегидрирования парафинов в олефины, циклопарафинов – в нафтены и в ароматические углеводороды. На кислотных центрах протекают реакции изомеризации и гидрокрекинга, продукты которых подвергаются реакциям дегидрирования на металлических центрах [9–11].

Необходимость подбора нового состава катализатора определяется не только экономической стороной, но и с экологической. Стандарты «ЕВРО» для моторных топлив с течением времени вводят более жесткие требования, взяв курс на экологизацию бензинов. Для улучшения физико-химических параметров, а также удовлетворения условий экологических стандартов требуется создание новых каталитических систем [12–13].

Для исследования активности бифункциональных катализаторов были проведены опыты на каталитических системах: цеолит высокомолекулярный (ЦВМ), Pt/ЦВМ (содержание платины 0,13 масс. %), Pr/ЦВМ (содержание празеодима 0,7масс. %), Pr,Pt/ЦВМ (содержание празеодима 0,7масс. %, платины 0,13 масс. %). Выбор ЦВМ



связан с особенностью узкого диапазона размера пор (от 0,3 до 0,7 нм), что не позволяет синтезироваться на поверхности носителя поликонденсированным ароматическим углеводородам. Метод пропитки был взят за основу нанесения металлов на носитель, остаточной раствор после пропитки был проанализирован спектрофотометрическим методом анализа.

Материалы и методы

Исследования активности всех каталитических систем проводились на лабораторной установке проточного типа в инертной среде при атмосферном давлении в интервале температур 400–500°C с интервалом 50°C. Скорость подачи сырья 8 мл/ч, объем загруженного катализатора 8 см³. В результате превращения сырья получено жидкое топливо многокомпонентного состава с количеством углеродных

атомов в цепи от 3 до 14, а также газы, содержащие углеводороды C₁ – C₅.

Расчет был осуществлен с помощью программы «Хроматэк Аналитик», которая позволяет установить детальный состав полученных смесей, относительную плотность, фракционный состав и октановое число продукта по исследовательскому и моторному методу. В качестве сырья использовался н-гексан, выбор обоснован наличием достаточного количества атомов углерода для реакций ароматизации с получением бензола, а также тем, что н-гексан входит в состав сырья каталитического реформинга.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены материальные балансы превращений н-гексана на четырех каталитических системах.

Таблица 1 / Table 1

Материальные балансы превращения н-гексана на каталитических системах ЦВМ, Pt/ЦВМ
Material balances for the transformation of the n-hexane on Pt/CVM and CVM catalytic systems

Приход Before			Расход After	ЦВМ / CVM						Pt/ЦВМ / Pt/CVM					
				400° C		450° C		500° C		400° C		450° C		500° C	
Масса Mass	г g	%	Масса Mass	г g	%	г g	%	г g	%	г g	%	г g	%	г g	%
н-гексан n-hexane	6,5	100,0	Жидкие продукты Liquidproduct	2,3	35,4	2,1	32,3	2,0	30,8	3,2	49,2	2,3	35,4	1,9	29,2
			Газовые продукты Gaseousproduct	4,2	64,6	4,4	67,7	4,5	69,2	3,3	50,8	4,2	64,6	4,6	70,8
Сумма Sum	6,5	100,0	Сумма Sum	6,5	100,0	6,5	100,0	6,5	100,0	6,5	100	6,5	100	6,5	100

Таблица 2 / Table 2

Материальные балансы превращения н-гексана на каталитических системах Pr/ЦВМ, Pt,Pr/ЦВМ
Material balances for the transformation of the n-hexane on Pt/CVM and Pt, Pr/CVM catalytic systems

Приход Before			Расход After	Pr/ЦВМ / Pr/CVM						Pt,Pr/ЦВМ / Pt,Pr/CVM					
				400° C		450° C		500° C		400° C		450° C		500° C	
Масса Mass	г g	%	Масса Mass	г g	%	г g	%	г g	%	г g	%	г g	%	г g	%
н-гексан n-hexane	6,5	100,0	Жидкие продукты Liquidproduct	2,1	32,3	1,9	29,2	1,6	24,6	2,6	40,0	2,3	35,4	1,9	29,2
			Газовые продукты Gaseousproduct	4,4	67,7	4,6	70,8	4,9	75,4	3,9	60,0	4,2	64,6	4,6	70,8
Сумма Sum	6,5	100,0	Сумма Sum	6,5	100,0	6,5	100,0	6,5	100,0	6,5	100	6,5	100	6,5	100

Потери составляли менее 3%.

Основным показателем при проведении процесса является конверсия сырья. На рис. 1

представлена диаграмма степени превращения н-гексана на каталитических системах в ряде температур.

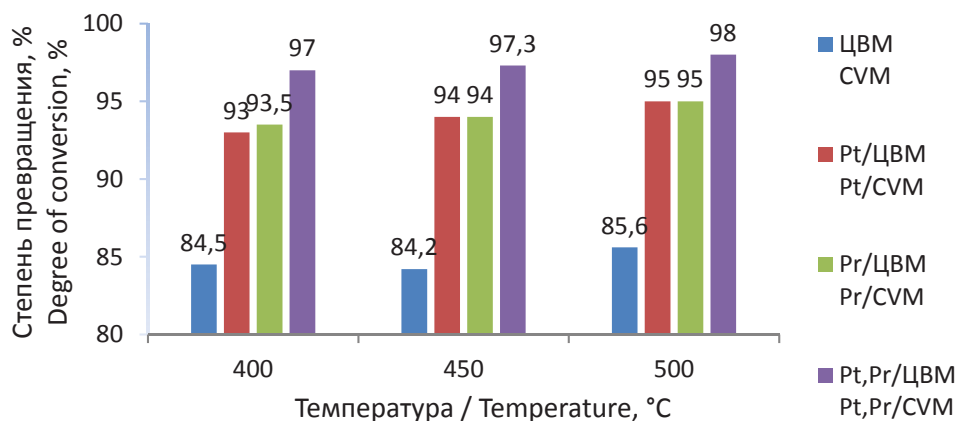


Рис. 1. Степень превращения н-гексана на катализаторах ЦВМ, Pt/ЦВМ, Pr/ЦВМ, Pt,Pr/ЦВМ
 Fig. 1. The degree of transformation of n-hexane on the catalysts of CVM, Pt/CVM, Pr/CVM, Pt, Pr/CVM

На рис. 1 видно, что увеличение степени превращения в ряде температур наблюдается у всех каталитических систем. На биметаллическом катализаторе Pt,Pr/ЦВМ при 500°C была установлена наибольшая степень превращения н-гексана.

В табл. 3 представлены составы газообразных продуктов превращения стабильного гидрогенизата на катализаторах ЦВМ, Pt/ЦВМ, Pr/ЦВМ, Pt,Pr/ЦВМ.

В результате превращения н-гексана с увеличением температуры наблюдается уве-

личение выхода газообразных продуктов (на ЦВМ – с 64,6 до 69,2 масс. %; на Pt/ЦВМ – с 50,8 до 70,8 масс. %; на Pr/ЦВМ – с 67,7 до 75,4 масс.%; на Pt,Pr/ЦВМ – с 60,0 до 70,8 масс. %), также достигается наибольшее выделение H₂ при 450°C на всех каталитических системах и выход CH₄ при 500°C, что свидетельствует об увеличении вклада реакций ароматизации и циклизации н-гексана при 450°C и вклада реакций гидрокрекинга при 500°C.

Таблица 3 / Table 3

Состав газообразных продуктов превращения н-гексана на четырех каталитических системах
 Composition of gaseous products of transformation of n-hexane on four catalytic systems

Компонент Component	Выход продуктов, % масс. / Product yield, wt. %											
	ЦВМ / CVM			Pt/ЦВМ / Pt/CVM			Pr/ЦВМ / Pr/CVM			Pt,Pr/ЦВМ / Pt,Pr/CVM		
	400°C	450°C	500°C	400°C	450°C	500°C	400°C	450°C	500°C	400°C	450°C	500°C
H ₂	–	–	1.3	0.3	4.2	0.2	–	7.6	5.5	0.1	2.7	1.6
CH ₄	1.0	0.6	5.3	1.0	4.3	7.4	0.5	8.3	15.8	0.5	26	45.9
CO ₂	9.6	–	0.3	0.1	0.3	0.2	8.5	0.8	–	0.1	0.2	0.5
C ₂ H ₄	–	0.7	6.4	0.9	1.5	3.0	5.0	2.4	10.8	1.7	2.7	3.4
C ₂ H ₆	–	2.6	35.3	5.9	16.0	25.4	0.7	17.5	24.6	4.1	7.0	8.9
C ₃ H ₆	64.5	76.4	29.0	66.6	56.0	47.8	60.5	58.1	39.3	74.1	27.6	34.0
C ₃ H ₈	–	–	19.3	–	–	–	3.1	–	–	0.8	0.5	0.3
C ₄ H ₁₀	22.3	19.1	2.5	16.6	16.1	7.5	19.6	5.2	3.8	15.6	6.2	3.4
C ₅ H ₁₂	1.6	–	–	1.1	0.7	0.4	0.8	–	–	0.5	0.4	0.2
Итого	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

В табл. 4 представлен основной групповой состав продуктов превращения н-гексана.

С повышением температуры селективность по реакциям изомеризации уменьшается, при

росте доли реакций ароматизации, что свидетельствует о росте массовой доли ароматических углеводородов в продуктах с повышением температуры проведения процесса (см. табл. 4).



Таблица 4 / Table 4

Основной групповой состав продуктов превращения n-гексана на различных каталитических системах, % масс.

The main group composition of n-hexane conversion products on various catalytic systems, wt. %

Компонент Component	ЦВМ / CVM			Pt/ЦВМ / Pt/CVM			Pr/ЦВМ / Pr/CVM			Pt,Pr/ЦВМ / Pt,Pr/CVM		
	400°C	450°C	500°C	400°C	450°C	500°C	400°C	450°C	500°C	400°C	450°C	500°C
Ароматические углеводороды Benzenehydrocarbons	14,8	18,6	20,7	21,2	23,5	28,2	19,3	20,8	24,1	16,4	26,0	32,4
Бензол Benzene	0,2	0,3	0,4	2,4	2,8	3,6	2,2	2,3	2,4	0,4	0,6	1,5
i-парафины C ₄ -C ₆ i-paraffine C ₄ -C ₅	18,9	14,2	6,3	23,4	15,1	10,1	17,8	15,1	7,4	27,6	17,6	14,2

В табл. 5 представлены показатели октанового числа (ОЧ) по исследовательскому и мотор-

ному методу продуктов превращения n-гексана на разных каталитических системах.

Таблица 5 / Table 5

Показатели октанового числа по исследовательскому и моторному методу продуктов превращения n-гексана на ЦВМ, Pt/ЦВМ, Pr/ЦВМ, Pt, Pr/ЦВМ

Octane number indicators according to the research and motor method of n-hexane conversion products on CVM, Pt/CVM, Pr/CVM, Pt, Pr/CVM

Катализатор Catalyst	Температура, °C Temperature, °C	Показатель ОЧ	
		Исследовательский метод (ИОЧ) Rated Octane Number	Моторный метод (МОЧ) Motor Octane Number
ЦВМ CVM	400	80,8	72,5
	450	85,6	93,4
	500	90,2	96,5
Pt/ЦВМ Pt/CVM	400	91,0	107,9
	450	90,1	107,6
	500	94,0	112
Pr/ЦВМ Pr/CVM	400	84,6	95,1
	450	90,1	102,3
	500	96,6	105,6
Pt,Pr/ЦВМ Pt,Pr/CVM	400	91,0	108,6
	450	93,5	112,4
	500	96,6	119,1

Исходя из информации табл. 4 и 5, уменьшение доли реакций изомеризации при проведении процесса (с 18,9 до 6,3 масс. % на катализаторе ЦВМ; с 23,4 до 10,1 масс. % на катализаторе Pt/ЦВМ; с 17,8 до 7,4 масс. % на катализаторе Pr/ЦВМ; с 27,6 до 14,2 масс. % на катализаторе Pt,Pr/ЦВМ) не влияет на значение октанового числа, так как компенсируется повышающимся выходом углеводородов ароматического строения. Несмотря на это, сохраняется высокий уро-

вень изопарафинов, что благотворно сказывается в условиях экологизации моторных топлив.

При превращении сырья на исследуемых катализаторах с увеличением температуры растет величина ОЧ и содержание ароматики. Максимальные значения октановых чисел наблюдаются при 500°C, это объясняется содержанием в реформате ароматических углеводородов и изоалканов, обладающих самой большой детонационной стойкостью.



В результате сгорания бензола образуется канцероген первого класса опасности – бензоперен. Вследствие этого в настоящее время по стандарту ЕВРО-5 вводится ограничение на содержание бензола в моторных топливах до 1,0 масс.%. Наб-

людается тенденция на понижение концентрации бензола в новых стандартах моторных топлив.

На рис. 2 представлена зависимость выхода бензола от температуры на разных каталитических системах.

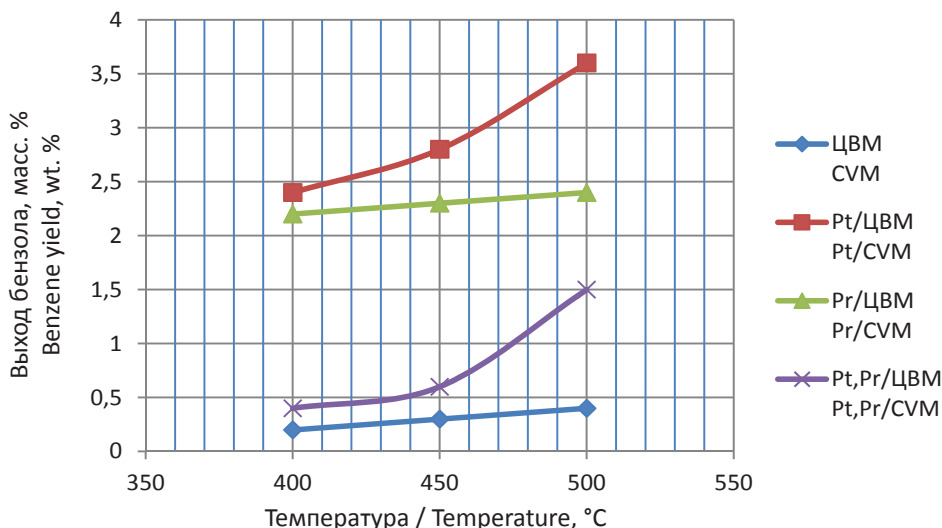


Рис. 2. Выход бензола при превращении н-гексана на катализаторах ЦВМ, Pt/ЦВМ, Pr/ЦВМ, Pt,Pr/ЦВМ

Fig. 2. Benzene yield during the conversion of n-hexane on the catalyzers CVM, Pt/CVM, Pr/CVM, Pt, Pr/CVM

С ростом температуры происходит увеличение количества бензола в реформате, что объясняется вкладом реакции ароматизации н-гексана. Минимальное количество бензола (0,6 масс. %) с учетом физико-химических параметров реформата наблюдается у биметаллического катализатора Pt,Pr/ЦВМ при 450°C.

Важными продуктами при превращении н-гексана на бифункциональных катализаторах являются ароматические соединения,

которые повышают октановые числа моторных топлив, но при сгорании образуют канцерогены, что негативно влияют на окружающую среду. По этой причине вводят ограничения по содержанию ароматических соединений в автомобильных топливах – не более 35 масс.%. На рис. 3 представлен график зависимости выхода ароматических углеводородов в ряде температур процесса превращения н-гексана на исследуемых катализаторах.

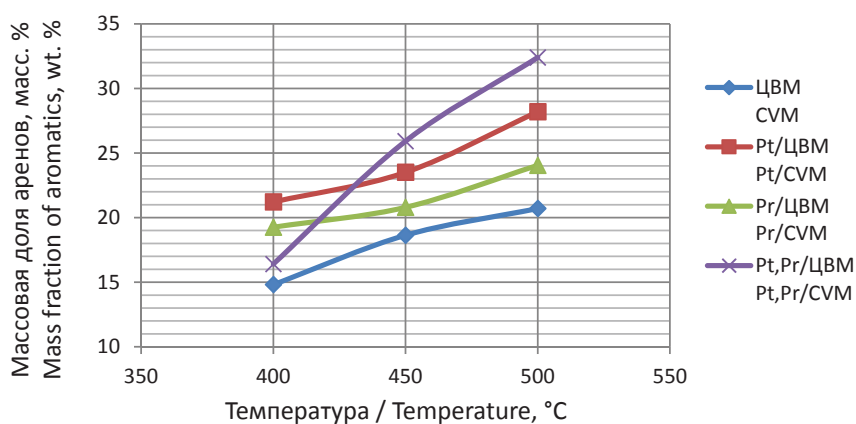


Рис. 3. Массовая доля ароматических соединений в продукте превращения н-гексана на исследуемых каталитических системах

Fig. 3. Mass fraction of aromatic compounds in the n-hexane conversion product on the studied catalytic systems



Наибольшее количество ароматических соединений было получено при превращении н-гексана на биметаллическом катализаторе Pt,Pr/ЦВМ при 500°C (32,40 ± 0,03 масс.%), меньше всего ароматических соединений из исследуемых каталитических систем было отмечено у ЦВМ.

Список литературы

1. Иванов В. А., Ромаденкина С. Б. Превращение н-гексана в условиях каталитического риформинга // *Modern Science*. 2021. № 11-3. С. 30–36. ID: 47275556
2. Аниськова Т. В., Ромаденкина С. Б., Кузьмина Р. И. Превращение стабильного катализата установки каталитического риформинга на катализаторе R-98 // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2017. Т. 17, вып. 4. С. 394–396. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2017-17-4-394-396>
3. Белый А. С. Современное состояние, перспективы развития процесса и катализаторов риформинга бензиновых фракций нефти // *Катализ в промышленности*. 2014. № 5. С. 23–28. ID: 21997499
4. Пат. 2727887 РФ. Установка каталитического риформинга с непрерывной регенерацией катализатора / Лебедской-Тамбиев М. А., Калабин Д. А., Ермоленко А. Д., Шишкин С. Н., Яблоков А. С., Александров Д. С., Дьяченко К. В., Воронина Ю. В., Чулков К. С., Черненко А. А., Завьялова Н. Н., Ханова Н. Г. Оpubл. 24.07.2020. Бюл. № 21.
5. Пат. 2677283 РФ. Способ получения биметаллических катализаторов с градиентной структурой на основе платины/Алексенко А. А., Гутерман В. Е., Беленов С. В., Новомлинский И. Н., Меньщиков В. С. Оpubл. 16.01.2019. Бюл. № 2.
6. Трегубенко В. Ю., Веретельников К. В., Белый А. С. Триметаллические катализаторы риформинга Pt-Sn-Zr/ γ -Al₂O₃ // *Кинетика и катализ*. 2019. Т. 60, № 5. С. 618–623. <https://doi.org/10.1134/S0453881119040233>
7. Романовский Б. В. Основы катализа : учебное пособие. М : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 172 с.
8. Георгиева Э. Ю., Михайлова М. Д., Мартынова А. В. Анализ эксплуатационных характеристик катализаторов риформинга // *Инновационные научные исследования: теория, методология, практика : сборник статей XVII Международной научно-практической конференции*. Пенза : Наука и Просвещение, 2019. С. 189–191. ID: 37629159
9. Алиев А. М., Шабанова З. А., Керимов А. И. Синтез и исследование цеолитов, модифицированных катионами металлов, в качестве катализаторов в реакции окислительного дегидрирования нафтеновых углеводородов // *Журнал прикладной химии*. 2017. Т. 90, № 5. С. 591–597. ID: 29429588

10. Бушуев Ю. Г. Цеолиты. Компьютерное моделирование цеолитных материалов. Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2011. 104 с.
11. Пат. 2712077 РФ. Способ получения катализатора и сам катализатор / Бауэр Ю., Дотцель Р., Мюнх Й. В. Оpubл. 27.01.2020. Бюл. № 3.
12. Агабеков В. Е., Косяков В. К. Нефть и газ: технологии и продукты переработки. Ростов н/Д : Феникс, 2014. 455 с.
13. Бакулина В. И., Воробьева Е. В. Пути оптимизации каталитического риформинга // *Новые технологии в учебном процессе и производстве : материалы XVII Международной научно-технической конференции*. Рязань : Рязаньпроект, 2019. С. 397–399. ID: 42472992

References

1. Ivanov V. A., Romadenkina S. B. Transformation of n-hexane under conditions of catalytic reforming. *Modern Science*, 2021, no. 11-3, pp. 30–36 (in Russian). ID: 47275556
2. Aniskova T. V., Romadenkina S. B., Kuzmina R. I. Transformation of a stable catalyzate of a catalytic reforming unit on an R-98 catalyst. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2017, vol. 17, iss. 4, pp. 394–396 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2017-17-4-394-396>
3. Belyi A. S. Current state, prospects for the development of the process and catalysts for reforming gasoline fractions of oil. *Catalysis in Industry*, 2014, no. 5, pp. 23–28 (in Russian). ID: 21997499
4. Pat. 2727887 of the Russian Federation. Installation of catalytic reforming with continuous regeneration of the catalyst / Lebedskoy-Tambiev M. A., Kalabin D. A., Ermolenko A. D., Shishkin S. N., Yablokov A. S., Alexandrov D. S., Dyachenko K. V., Voronina Yu. V., Chulkov K. S., Chernenko A. A., Zavyalova N. N., Khanova N. G. Publ. July 24, 2020. Byul. no. 21 (in Russian).
5. Pat. 2677283 of the Russian Federation. A method for obtaining bimetallic catalysts with a gradient structure based on platinum / Aleksenko A. A., Guterma V. E., Belenov S. V., Novomlinsky I. N., Menshchikov V. S. Publ. January 16, 2019. Byul. no. 2 (in Russian).
6. Tregubenko V. Y., Veretelnikov K. V., Belyi A. S. Trimetallic catalysts for Pt-Sn-Zr/ γ -Al₂O₃ reforming. *Kinetics and Catalysis*, 2019, vol. 60, no. 5, pp. 618–623 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0453881119040233>
7. Romanovsky B. V. *Osnovy kataliza* [Fundamentals of Catalysis: textbook]. Moscow, BINOM. Knowledge Lab., 2015. 172 p. (in Russian).
8. Georgieva E. Y., Mikhailova M. D., Martynova A. V. Analysis of the Performance Characteristics of Reforming Catalysts. *Innovative Scientific Research: Theory, Methodology, Practice: Collection of articles*



- of the XVII International scientific and practical conference. Penza, Nauka i Prosvyashchenie, 2019, pp. 189–191 (in Russian). ID: 37629159
9. Aliev A. M., Shabanova Z. A., Kerimov A. I. Synthesis and study of zeolites modified with metal cations as catalysts in the reaction of oxidative dehydrogenation of naphthenic hydrocarbons. *Journal of Applied Chemistry*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 591–597 (in Russian). ID: 29429588
 10. Bushuev Y. G. *Ceolity. Komp'yuternoe modelirovanie ceolitnykh materialov* [Zeolites. Computer Modeling of Zeolite Materials]. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology Publ., 2011. 104 p. (in Russian).
 11. Pat. 2712077 of the Russian Federation. The method of obtaining the catalyst and the catalyst itself / Bauer Yu., Dotzel R., Munch Y. V. Publ. January 27, 2020. Byul. no. 3.
 12. Agabekov V. E., Kosyakov V. K. *Neft' i gaz: tekhnologii i produkty pererabotki* [Oil and Gas: Technologies and Products of Processing]. Rostov-on-Don, Feniks, 2014. 455 p. (in Russian).
 13. Bakulina V. I., Vorobyeva E. V. Ways of optimizing catalytic reforming. *New Technologies in the Educational Process and Production: Materials of the XVII International Scientific and Technical Conference*. Ryazan, Ryazanproekt, 2019, pp. 397–399 (in Russian). ID: 42472992

Поступила в редакцию 06.03.20223; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 28.03.2023
The article was submitted 06.03.20223; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 28.03.2023