

ЗАВИСИМОСТЬ УГЛЕВОДОРОДНОГО И ФРАКЦИОННОГО СОСТАВОВ ВЫСОКООКТАНОВЫХ БЕНЗИНОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОЦЕССА, СПОСОБА МОДИФИЦИРОВАНИЯ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ ЦЕОЛИТНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

Л.М. Величкина

Людмила Михайловна Величкина (ORCID 0000-0002-3137-3796)

Лаборатория каталитической переработки легких углеводородов, Институт химии нефти СО РАН,
пр. Академический, 4, Томск, Российская Федерация, 634055

E-mail: mps@ipc.tsc.ru

Методом газовой хроматографии определен групповой углеводородный и фракционный составы высокооктановых бензинов, образующихся в процессе облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти на цеолите типа MFI и цеолитных катализаторах, полученных на его основе постсинтетической щелочной обработкой и последующим модифицированием наноразмерным порошком никеля. Исследована зависимость группового углеводородного и фракционного составов высокооктановых бензинов от температуры процесса, способов модифицирования цеолитного катализатора и количества циклов «реакция – регенерация». Сделан сравнительный анализ катализаторов на соответствие современным нормативным требованиям к автомобильным бензинам по углеводородному и фракционному составам. Установлено, что повышение температуры процесса значительно увеличивает образование ароматических углеводородов, содержание которых строго нормируется, поэтому для получения высокооктановых бензинов с требуемым углеводородным составом определен оптимальный температурный диапазон реакции. Показано, что щелочная обработка цеолита приводит к значительному снижению концентрации аренов в получаемых высокооктановых бензинах, а последующее введение в цеолит нанопорошка никеля позволяет еще и повысить содержание изоалканов, являющихся, как и арены, высокооктановыми компонентами, но, в отличие от них, не ограничиваемых нормативами. Определено, что переработка прямогонной бензиновой фракции нефти на цеолитных катализаторах во всем исследованном температурном интервале процесса способствует расширению фракционного состава образующихся катализаторов. По всем показателям, кроме температуры конца кипения, полученные катализаторы соответствуют летнему автомобильному бензину. На катализаторах после щелочной обработки и модифицирования нанопорошком никеля образуется большее количество легких фракций по сравнению с исходным цеолитом. Показано, что проведение циклов «реакция – регенерация» для никельсодержащего цеолитного катализатора практически не повлияло на групповой углеводородный и фракционный составы полученных бензинов, что свидетельствует о перспективности применения данного катализатора для длительных испытаний.

Ключевые слова: высокооктановый бензин, групповой углеводородный состав, фракционный состав, цеолит MFI, пентасил, щелочная обработка, нанопорошок никеля

Для цитирования:

Величкина Л.М. Зависимость углеводородного и фракционного составов высокооктановых бензинов от температуры процесса, способа модифицирования и длительности работы цеолитных катализаторов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 8. С. 58–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.2t.

For citation:

Velichkina L.M. Dependence of hydrocarbon and fractional compositions of high-octane gasolines on the process temperature, modification method and duration of operation of zeolite catalysts. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 8. P. 58–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20256808.2t.

DEPENDENCE OF HYDROCARBON AND FRACTIONAL COMPOSITIONS OF HIGH-OCTANE GASOLINES ON THE PROCESS TEMPERATURE, MODIFICATION METHOD AND DURATION OF OPERATION OF ZEOLITE CATALYSTS

L.M. Velichkina

Ludmila M. Velichkina (ORCID 0000-0002-3137-3796)

Laboratory of Catalytic Conversion of Light Hydrocarbons, Institute of Petroleum Chemistry of SB of the RAS, Akademicheskii ave., 4, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: mps@ipc.tsc.ru

The group hydrocarbon and fractional compositions of high-octane gasolines formed during the upgrading of straight-run gasoline fraction of oil on MFI zeolite and zeolite catalysts obtained on its basis by post-synthetic alkali treatment and subsequent modification with nanosized nickel powder have been determined by gas chromatography. The dependence of the group hydrocarbon and fractional compositions of high-octane gasolines on the process temperature, methods of modifying the zeolite catalyst and the number of reaction-regeneration cycles has been studied. A comparative analysis of the catalysates for compliance with modern regulatory requirements for motor gasolines in terms of hydrocarbon and fractional compositions has been made. It has been established that an increase in the process temperature significantly increases the formation of aromatic hydrocarbons, the content of which is strictly standardized. Therefore, the optimal reaction temperature range has been determined to obtain high-octane gasolines with the required hydrocarbon composition. It is shown that alkaline treatment of zeolite leads to a significant decrease in the concentration of arenes in the resulting high-octane gasolines, and the subsequent introduction of nickel nanopowder into the zeolite also allows increasing the content of isoalkanes, which, like arenes, are high-octane components, but, unlike them, are not limited by standards. It was determined that processing of straight-run gasoline fraction of oil on zeolite catalysts in the entire studied temperature range of the process contributes to the expansion of the fractional composition of the resulting catalysates and, with the exception of the end boiling point, they correspond to summer motor gasoline. On the catalysts after alkaline treatment and modification with nickel nanopowder, a greater number of light fractions are formed compared to the original zeolite. It was shown that carrying out the "reaction - regeneration" cycles for the nickel-containing zeolite catalyst had virtually no effect on the group hydrocarbon and fractional compositions of the resulting gasolines, which indicates the prospects for using this catalyst for long-term tests.

Keywords: high octane gasoline, group hydrocarbon composition, fractional composition, MFI zeolite, pentasil, alkaline treatment, nickel nanopowder

ВВЕДЕНИЕ

Автомобильный бензин является одним из наиболее востребованных видов топлива, производство которого в связи с увеличением парка эксплуатируемых автомобилей непрерывно возрастает [1-5]. К основным лимитирующим факторам его производства и применения относятся ограничения, связанные с охраной окружающей среды, что заставляет производителей совершенствовать технологии получения товарного топлива и его состав [6-10].

Применение для облагораживания низкооктановых бензиновых фракций каталитических систем на основе цеолитов семейства пентасил (другие названия MFI или ZSM-5), не требующих наличия в зоне реакции водородсодержащего газа и повышенного давления, обладающих развитой пористой структурой и кислотностью, позволяет

регулировать направления превращения углеводородных молекул сырья для получения высокооктановых катализаторов с требуемыми характеристиками [11-20].

К основным характеристикам автомобильных бензинов относят углеводородный и фракционный составы, а также детонационную стойкость, определяемую величиной октанового числа [10, 21-26].

Групповой углеводородный состав бензинов характеризуется содержанием в них ароматических, олефиновых, нафтеновых и парафиновых углеводородов [24, 26]. Увеличение количества ароматических углеводородов в бензине не только повышает октановое число, но и способствует соответствующему увеличению их концентрации в отработавших автомобильных газах [8, 9]. Одним

из установленных последствий повышения содержания ароматических углеводородов в бензине является увеличение выбросов в окружающую среду наиболее экологически опасного их представителя – бензола, поэтому, согласно современным требованиям к автомобильным бензинам, суммарное содержание в них аренов не должно превышать 35% об., а доля бензола не должна быть более 1% об. [27]. Олефиновые углеводороды, содержащиеся в бензине, обуславливают выброс в окружающую среду с отработавшими газами озonoобразующих веществ и токсичных диеновых соединений, а также являются основным источником образования смолистых веществ. Максимальное содержание олефиновых углеводородов в бензине не должно превышать 18% об. [27].

Фракционный состав бензина – это главный показатель его испаряемости, важнейшая характеристика качества топлива. К основным фракциям автомобильного бензина относят пусковую, рабочую и концевую. Пусковая фракция состоит из низкокипящих углеводородов – это первые 10% всего дистиллята, рабочая фракция включает дистилляты от 10% до 90% объема, а концевая фракция соответствует объему отгона бензина от 90% до конца кипения. Следовательно, фракционный состав бензина нормируется пятью температурными характеристиками: началом перегонки, перегонкой 10%, 50%, 90% объема и концом кипения [27].

Характеристику бензина по холодному запуску принято связывать с температурой перегонки 10% бензина. Нижний температурный предел выкипания 10% объема бензина ограничивают, чтобы избежать образования паровых пробок в двигателе. Большинство современных автомобилей отличаются хорошей характеристикой по холодному запуску, и значимость этого показателя спецификации как фактора, ограничивающего запуск, несколько снизилась при условии достаточной испаряемости средних дистиллятных фракций, соответствующих температурной перегонке 50% бензина. Температура перегонки концевых фракций (от 90% до конца кипения) влияет на полноту его испарения и сгорания. Не полностью сгоревшие углеводородные компоненты бензина увеличивают токсичность выхлопа и износ двигателя, снижая его экономичность [10, 21-23].

Октановое число бензина показывает детонационную стойкость топлива и характеризует устойчивость горючей жидкости к самопроизвольному возгоранию в результате сжатия, и, тем самым, влияет на функционирование двигателя внут-

ренного сгорания. Величина октанового числа зависит от углеводородного и фракционного составов бензина [10, 23, 25]. Несмотря на широкое практическое использование, определение октановых чисел автомобильных бензинов представляет собой сложную многостадийную процедуру, реализация которой часто затруднена из-за ряда недостатков текстов нормативных документов, содержащих изложение данной методики [25].

Таким образом, анализ современных литературных данных, посвященных проблеме получения высокооктановых автомобильных бензинов с требуемым углеводородным и фракционным составом, показывает неослабевающий научно-практический интерес к поиску и совершенствованию технологий и способов получения качественных бензинов с улучшенными экологическими свойствами.

Целью настоящей работы было исследование зависимости группового углеводородного и фракционного составов высокооктановых бензинов от температуры процесса облагораживания прямогонной бензиновой фракции нефти, от способа модифицирования цеолитного катализатора и длительности его работы в циклах «реакция – регенерация».

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Высокооктановые бензины получены на цеолитных катализаторах, приготовленных на основе исходного цеолита типа пентасил в H-форме с силикатным модулем 40 (образец MFI), цеолита, обработанного 0,3 М водным раствором NaOH (образец MFI_щ), и цеолита после щелочной обработки, модифицированного наноразмерным порошком никеля (образец Ni/MFI_щ) [18, 19].

Каталитический процесс превращения прямогонной бензиновой фракции нефти на полученных цеолитных образцах проведен в установке проточного типа с неподвижным слоем катализатора объемом 4 см³ при атмосферном давлении, температурах 340-400 °С с шагом 20 °С и объемной скорости подачи сырья 2 ч⁻¹. В качестве сырья взята прямогонная бензиновая фракция нефти с октановым числом по исследовательскому методу 65 пунктов, имеющая групповой углеводородный состав (% мас.): 32,4 *n*-алканов C₅–C₁₂; 37,4 изоалканов C₄–C₁₀; 7,3 аренов C₆–C₁₂; 22,9 циклоалканов C₅–C₁₀. Фракционный состав прямогонной бензиновой фракции нефти соответствовал (°С): 45 – начало перегонки (Н.п.), 63 – 10%, 104 – 50%, 152 – 90%, 190 – конец кипения (К.к.).

Процесс превращения прямогонной бензиновой фракции нефти осуществлен при темпера-

туре 380 °С, объемной скорости подачи сырья 2 ч⁻¹ и атмосферном давлении. Обработку проводили с циклической регенерацией зауглероженного катализатора прокаливанием при температуре 600 °С в течение 4 ч в атмосфере воздуха. Для определения зависимости группового углеводородного и фракционного составов получаемых бензинов от длительности работы катализатора для образца Ni/MFI_ц было выполнено 3 цикла «реакция – регенерация», длительность работы катализатора в каждом цикле составляла 40 ч.

Отбор жидких продуктов реакции проведен после 1 ч работы катализаторов. Групповой углеводородный и фракционный составы исходного

прямогонного и полученных высокооктановых бензинов проанализированы методом газовой хроматографии с использованием хроматографа «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с капиллярной колонкой ВР-1 PONA (100 м × 0,25 мм × 0,5 мкм). Относительная погрешность метода не превышает 2,5%. Октановые числа бензинов определены расчетным методом на основе хроматографических данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены данные по влиянию температуры процесса и способа модифицирования цеолитов на групповой углеводородный состав образующихся высокооктановых бензинов.

Таблица 1

Влияние температуры процесса и способа модифицирования цеолитных катализаторов на групповой углеводородный состав высокооктановых бензинов

Table 1. The influence of process temperature and method of modification of zeolite catalysts on the group hydrocarbon composition of high-octane gasolines

Состав бензина (% мас.), октановое число	Сырье	Катализатор	Температура процесса, °С				
			340	360	380	400	
<i>n</i> -Алканы C ₅ –C ₁₂	32,4	MFI	13,5	10,5	9,8	8,2	
Изоалканы C ₄ –C ₁₀	37,4		32,3	30,6	29,2	28,1	
Арены C ₆ –C ₁₂	7,3		29,7	34,8	39,7	48,9	
- в том числе бензол	0,2		0,9	1,0	1,8	2,4	
Циклоалканы C ₅ –C ₁₀	22,9		22,6	22,2	19,5	13,0	
Алкены C ₄ –C ₁₀	-		1,9	1,9	1,8	1,8	
Октановое число	65		90	91	94	97	
<i>n</i> -Алканы C ₅ –C ₁₂			MFI _ц	18,9	18,2	13,5	13,1
Изоалканы C ₄ –C ₁₀				33,7	33,5	32,4	30,3
Арены C ₆ –C ₁₂				24,2	25,9	32,2	38,7
- в том числе бензол		0,8		0,9	1,0	1,7	
Циклоалканы C ₅ –C ₁₀		21,3		20,7	20,4	16,4	
Алкены C ₄ –C ₁₀		1,9		1,7	1,5	1,5	
Октановое число		86	87	90	93		
<i>n</i> -Алканы C ₅ –C ₁₂		Ni/MFI _ц	13,8	13,5	11,1	9,3	
Изоалканы C ₄ –C ₁₀			36,7	36,6	33,9	30,8	
Арены C ₆ –C ₁₂			24,3	25,0	31,7	38,0	
- в том числе бензол			0,8	0,9	1,0	2,0	
Циклоалканы C ₅ –C ₁₀			21,8	21,6	20,2	18,8	
Алкены C ₄ –C ₁₀			3,4	3,3	3,1	3,1	
Октановое число		87	88	91	93		

По групповому углеводородному составу жидкие продукты, полученные на исходном цеолите и обработанных образцах, идентичны. С повышением температуры реакции в составе образующихся бензинов значительно увеличивается содержание ароматических углеводородов, что приводит к увеличению октановых чисел. Бензины, полученные на исходном образце MFI, имеют самые высокие октановые числа благодаря максимальному содержанию ароматических углеводородов. Современным требованиям на автомобильные

бензины по содержанию аренов и бензола отвечают катализаты, образующиеся при 340–360 °С на исходном цеолите MFI, и при 340–380 °С на образцах MFI_ц и Ni/MFI_ц. Постсинтетическая щелочная обработка цеолита MFI и последующее введение нанопорошка никеля снижают образование ароматических углеводородов и, соответственно, величину октановых чисел получаемых бензинов, которые при этом остаются достаточно высокими. Превалирующее влияние на снижение количества аренов оказывает щелочная обработка. На образце

Ni/MFI_ц, по сравнению с образцом MFI_ц, незначительно повышаются значения октановых чисел бензинов вследствие увеличения концентрации изоалканов, которые, наряду с аренами, являются высокооктановыми компонентами, но при этом не представляют угрозы для окружающей среды и здоровья человека, поэтому их содержание не ограничивается современными стандартами на автомобильное топливо. Таким образом, постсинтетическая щелочная обработка цеолита и последующее введение нанопорошка никеля положительно повлияли на групповой углеводородный состав катализаторов, позволив расширить температурный диапазон реакции для получения высокооктановых бензинов с требуемыми характеристиками.

В табл. 2 на примере образца Ni/MFI_ц показана зависимость группового углеводородного состава высокооктановых бензинов от количества циклов «реакция – регенерация».

Таблица 2

Влияние количества циклов «реакция – регенерация» на групповой углеводородный состав высокооктановых бензинов (катализатор Ni/MFI_ц, T процесса = 380 °C)

Table 2. The influence of the number of “reaction-regeneration” cycles on the group hydrocarbon composition of high-octane gasolines (Ni/MFI_ц catalyst, process T = 380 °C)

Состав бензина (% мас.), октановое число	Количество циклов		
	1	2	3
<i>n</i> -Алканы C ₅ –C ₁₂	12,8	13,0	13,8
Изоалканы C ₄ –C ₁₀	35,0	35,6	36,3
Арены C ₆ –C ₁₂	29,2	28,7	27,4
Циклоалканы C ₅ –C ₁₀	20,0	19,7	19,3
Алкены C ₄ –C ₁₀	3,0	3,0	3,2
Октановое число	90	90	89

Групповой углеводородный состав бензинов, полученных на регенерированных катализаторах в разных циклах, практически не изменяется. Концентрация ароматических углеводородов незначительно снижается с каждой последующей регенерацией, но при этом повышается доля алканов изостроения, поэтому величина октановых чисел одинакова для катализаторов, полученных после первого и второго циклов «реакция – регенерация» и снижается на 1 пункт после третьего цикла. Следовательно, полученные данные свидетельствуют о стабильной работе катализатора Ni/MFI_ц и сохранении его каталитической активности в трех циклах «реакция – регенерация» суммарной продолжительностью 120 ч.

Наряду с групповым углеводородным составом и величиной октановых чисел автомобильных бензинов важнейшей характеристикой является фракционный состав топлива. В табл. 3 приведены нормированные требования, предъявляемые ГОСТ [27] к основным фракциям автомобильного бензина, а в табл. 4 приведен фракционный состав сырья – прямогонной бензиновой фракции нефти и высокооктановых бензинов, полученных из нее на цеолитных катализаторах.

Повышение температуры процесса при переработке прямогонной бензиновой фракции нефти на цеолитных катализаторах способствует расширению фракционного состава образующихся бензинов – снижается температура начала перегонки и увеличивается температура конца кипения. При этом температура начала перегонки всех полученных катализаторов соответствует предъявляемым требованиям. Показатель «Температура 10% выкипания» отвечает требованиям, предъявляемым к летнему топливу. Катализаты, полученные на исходном цеолите MFI при температуре реакции 400 °C и на образце MFI_ц при 360-400 °C, соответствуют требованиям к зимнему топливу. 50% объема отгона катализаторов, образовавшихся на исходном и обработанном раствором щелочи цеолитах при температурах реакции 340-400 °C, перегоняется в рамках требований, предъявляемым к летнему бензину, исключение составляет только бензин, полученный на исходном цеолите при 400 °C. Модифицирование цеолита нанопорошком никеля повысило температуру 50% отгона. Летнему топливу по фракционному составу отвечают только катализаты, образующиеся при 340-360 °C. Зимнему топливу по температуре 50% отгона соответствуют бензины, образующиеся при 340-360 °C на цеолите MFI_ц. Температура отгона 90% всех полученных бензинов соответствует летнему виду топлива, а зимнему – катализаты, полученные на исходном цеолите при 340 °C, и при 340-360 °C на образцах MFI_ц и Ni/MFI_ц. Температура конца кипения для всех полученных бензинов выше требуемой величины, поэтому для доведения до нормативных требований потребуются их фракционирование. Таким образом, почти все полученные высокооктановые бензины по своему фракционному составу (за исключением температуры конца кипения) соответствуют летнему моторному топливу. Щелочная обработка цеолита MFI и последующее модифицирование нанопорошком никеля уменьшают температуры начала перегонки и 10% отгона, что свидетельствует об образовании большего количества легких фракций на обработанных катализаторах по сравнению с исходным цеолитом.

Таблица 3

Требования к фракционному составу автомобильных бензинов [27]
Table 3. Requirements for the fractional composition of motor gasolines [27]

V, % об.	T _{отгона} , °C
Н.п., не ниже: – летний – зимний	30-35 не нормиров.
10%, не выше: – летний – зимний	70-75 55
50%, не выше: – летний – зимний	115-120 100-105
90%, не выше: – летний – зимний	180 160
К.к., не выше: – летний – зимний	205 195

Примечание. V – объем отгона бензина, T_{отгона} – температура отгона бензина, Н.п. – начало перегонки, К.к – конец кипения
 Note: V – volume of gasoline distillate, T_{отгона} – temperature of gasoline distillate, Н.п. – beginning of distillation, К.к – end of boiling

Таблица 4

Влияние температуры процесса и способа модифицирования цеолитных катализаторов на фракционный состав высокооктановых бензинов
Table 4. The influence of process temperature and method of modification of zeolite catalysts on the fractional composition of high-octane gasolines

Объем отгона бензина, % об.	Сырье	Катализатор	Температура процесса, °C			
			340	360	380	400
Начало перегонки	45	MFI	43	40	34	31
10%	63		67	63	62	55
50%	104		110	114	115	123
90%	152		155	161	164	168
Конец кипения	190		206	213	219	223
Начало перегонки		MFI _ц	40	32	31	30
10%			61	55	54	52
50%			101	104	109	111
90%			153	159	161	162
Конец кипения			207	216	218	221
Начало перегонки		Ni/MFI _ц	34	32	31	31
10%			60	58	59	62
50%			117	114	122	125
90%			159	160	162	164
Конец кипения			214	215	216	217

Примечание. Температура отгона бензиновых фракций указана в °C

Note: The distillation temperature of gasoline fractions is indicated in °C

В табл. 5 показана зависимость фракционного состава бензина от количества регенераций и суммарной длительности работы катализатора Ni/MFI_ц.

Таблица 5

Влияние количества циклов «реакция – регенерация» на фракционный состав высокооктановых бензинов (катализатор Ni/MFI_ц, T процесса = 380 °C)
Table 5. The influence of the number of “reaction-regeneration” cycles on the fractional composition of high-octane gasolines (Ni/MFI_ц catalyst, process T = 380 °C)

Цикл	V, % об.	T _{отгона} , °C
1	Н.п.	30
	10%	58
	50%	115
	90%	158
	К.к.	207
2	Н.п.	29
	10%	56
	50%	114
	90%	158
	К.к.	206
3	Н.п.	28
	10%	52
	50%	111
	90%	157
	К.к.	204

Примечание. V – объем отгона бензина, T_{отгона} – температура отгона бензина, Н.п. – начало перегонки, К.к – конец кипения
 Note: V – volume of gasoline distillate, T_{отгона} – temperature of gasoline distillate, Н.п. – beginning of distillation, К.к – end of boiling

Представленные данные показывают незначительное уменьшение температур отгона фракций с каждым последующим циклом «реакция – регенерация». Все катализаторы по своему фракционному составу, за исключением отклонения от нормативов на 1-2 °C температуры начала перегонки бензинов второго и третьего циклов и температуры конца кипения бензинов первого и второго циклов, соответствуют требованиям к летнему автомобильному топливу.

ВЫВОДЫ

На групповой углеводородный состав высокооктановых бензинов максимальное влияние оказывает температура процесса переработки прямогонной бензиновой фракции нефти. Постсинтетическая щелочная обработка цеолита типа MFI с последующим введением нанопорошка никеля улучшает групповой углеводородный состав бензинов, снижая содержание в них ароматических углеводородов и незначительно повышая концентрацию изоалканов при сохранении высоких значений октановых чисел.

Повышение температуры процесса при переработке прямогонной бензиновой фракции нефти на цеолитных катализаторах способствует расширению фракционного состава образующихся бензинов. Практически все полученные высокооктановые бензины по своему фракционному составу, за исключением температуры конца кипения, соответствуют летнему моторному топливу. Щелочная обработка цеолита и модифицирование нанопорошком никеля способствуют образованию большего количества легких фракций по сравнению с исходным цеолитом.

Проведение для никельсодержащего катализатора циклов «реакция – регенерация» приводит к незначительному снижению концентрации аренов и повышению содержания изоалканов при неизменной величине октановых чисел образующихся бензинов. Во фракционном составе наблюдается небольшое уменьшение температур отгона фракций с каждым последующим циклом «реакция – регенерация».

Полученные данные свидетельствуют об улучшении группового углеводородного и фракционного составов высокооктановых бензинов, полученных на обработанных и регенерированных цеолитных катализаторах.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИ-ОКТР 121031200182-5).

This scientific work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Registration Number 121031200182-5).

ОТСУТСТВИЕ КОНФЛИКТА ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The author declares the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панков Д.А., Афанасьев В.Я. Тенденции и прогнозы развития рынка нефтепродуктов. *Пробл. экономики и юрид. практики.* 2020. Т. 16. № 5. С. 28–34. DOI: 10.33693/2541-8025-2020-16-5-28-34.
2. Капогузов Е.А., Чупин Р.И., Харламова М.С. Сценарии развития нефтехимической отрасли России в условиях санкций: прогноз конъюнктуры рынка автомобильного бензина на основе байесовского подхода. *Вестн. Перм. ун-та. Сер. Экономика.* 2017. Т. 12. № 3. С. 421–436. DOI: 10.17072/1994-9960-2017-3-421-436.
3. Низамова Г.З., Гайфуллина М.М. Корреляционно-регрессионный анализ рынка автомобильных бензинов. *Вестн. УГНТУ. Наука, образование, экономика. Сер. Экономика.* 2021. Т. 3. № 37. С. 35–44. DOI: 10.17122/2541-8904-2021-3-37-35-44.
4. Низамова Г.З., Гайфуллина М.М. Анализ конъюнктуры товарного рынка автомобильных бензинов. *Экономика и управление: науч.-практ. журн.* 2023. № 5. С. 38–43. DOI: 10.34773/EU.2023.5.7.
5. Сафронов Е.М., Бугаев Е.С., Зуйков А.В., Ершов М.А., Капустин В.М. Анализ перспективы производства и потребления нефтепродуктов в Российской Федерации. *Мир нефтепродуктов: науч.-техн. журн.* 2023. № 1. С. 32–41. DOI: 10.32758/2782-3040-2023-0-1-32-41.
6. Минаева И.А., Казакова З.А. Актуальные подходы к производству современных высокоэкологических бензинов. *Охрана труда и техника безопасности на промышл. предприятиях.* 2021. № 8. С. 67–73. DOI: 10.33920/pro-4-2108-11.
7. Сафронов Е.М., Ершов М.А., Савеленко В.Д., Старостин А.А., Капустин В.М. Высокооктановые компоненты автомобильных бензинов как решение проблем топливного обеспечения России. *Мир нефтепродуктов: науч.-техн. журн.* 2024. № 1. С. 40–52. DOI: 10.32758/2782-3040-2024-0-1-40-52.

REFERENCES

1. Pankov D.A., Afanasiev V.Ya. Oil product market trends and forecasts. *Probl. Econom. Yurid. Praktiki.* 2020. V. 16. N 5. P. 28–34 (in Russian). DOI: 10.33693/2541-8025-2020-16-5-28-34.
2. Kapoguzov E.A., Chupin R.I., Kharlamova M.S. Scenarios for Russian petrochemical industry development under sanctions: forecast of automobile gasoline market based on the Bayesian approach. *Vestn. Perm. Univ. Ser. Ekonomika.* 2017. V. 12. N 3. P. 421–436 (in Russian). DOI: 10.17072/1994-9960-2017-3-421-436.
3. Nizamova G.Z., Gaifullina M.M. Korrelation and regression analysis of the automotive gasoline market. *Vestn. UGNTU. Nauka, Obraz., Ekonom. Ser. Ekonom.* 2021. V. 3. N 37. P. 35–44 (in Russian). DOI: 10.17122/2541-8904-2021-3-37-35-44.
4. Nizamova G.Z., Gaifullina M.M. Analysis of the Conjunction of the Commodity Market of Automobile Gasoline. *Ekonom. Upravl.. Nauch.-Prakt. Zhurn.* 2023. N 5. P. 38–43 (in Russian). DOI: 10.34773/EU.2023.5.7.
5. Safronov E.M., Bugaev E.S., Zuikov A.V., Ershov M.A., Kapustin V.M. Analysis of petroleum product production and consumption prospects in the Russian Federation. *Mir Nefteprod.: Nauch.-Tekhn. Zhurn.* 2023. N 1. P. 32–41 (in Russian). DOI: 10.32758/2782-3040-2023-0-1-32-41.
6. Minaeva I.A., Kazakova Z.A. Actual approaches to the production of modern highly environmentally friendly gasoline. *Okhrana Truda Tekh. Bezopasn. Promyshl. Predpriyat.* 2021. N 8. P. 67–73 (in Russian). DOI: 10.33920/pro-4-2108-11.
7. Safronov E.M., Ershov M.A., Savelenko V.D., Starostin A.A., Kapustin V.M. High-octane components of motor gasolines as a solution to Russia's fuel supply problems. *Mir Nefteprod.: Nauch.-Tekhn. Zhurn.* 2024. N 1. P. 40–52 (in Russian). DOI: 10.32758/2782-3040-2024-0-1-40-52.

8. **Махмудов М.Ж., Наубеев Т.Х., Досназаров А.Б.** Получение автомобильного бензина, отвечающего экологическим требованиям Евростандарта по содержанию бензола. *Защита окр. среды в нефтегаз. комплексе*. 2021. № 1. С. 42–45. DOI: 10.33285/2411-7013-2021-1(298)-42-45.
9. **Смоленская Н.М., Смоленский В.В.** Токсичность отработавших газов в бензиновых двигателях при работе на сжатом природном газе и бензине. *Вестн. ЮУрГУ. Сер. Машиностр.* 2018. Т. 18. № 4. С. 57–65. DOI: 10.14529/engin180406.
10. **Ясашин В.А., Мартынова Е.И.** Оценка качественных характеристик нефти и нефтепродуктов. *Оборуд. и техн. для нефтегаз. комплекса*. 2021. № 2. С. 35–42. DOI: 10.33285/1999-6934-2021-2(122)-35-42.
11. **Ерофеев В.И., Хомяков И.С., Егорова Л.А.** Получение высокооктановых бензинов из прямогонных бензинов на модифицированных цеолитах ZSM-5. *Теор. осн. хим. технол.* 2014. Т. 48. № 1. С. 77–82. DOI: 10.7868/S0040357114010023.
12. **Алтынов А.А., Богданов И.А., Белинская Н.С., Попок Е.В., Киргина М.В.** Производство автомобильных бензинов с использованием стабильного газового конденсата и продуктов процесса «Цеоформинг» в качестве смесевых компонентов. *Нефтегаз. дело*. 2019. № 2. С. 217–242. DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-217-242.
13. **Барильчук М., Ростанин Н.Н., Сергеева К.А.** Превращение бензиновых фракций в высокооктановые компоненты автомобильных бензинов на цеолитсодержащих катализаторах. *Экспозиция Нефть Газ*. 2024. № 2. С. 60–64. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-2-60-64.
14. **Kirgina M., Belinskaya N., Altynov A., Bogdanov I., Temirbolat A.** Transformations of stable gas condensate hydrocarbons into high-octane gasoline components over ZSM-5 zeolite catalyst. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2020. V. 84. P. 103605. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103605.
15. **Величкина Л.М., Барбашин Я.Е., Восмериков А.В.** Влияние щелочной обработки на физико-химические и каталитические свойства цеолита типа ZSM 5 в процессе превращения прямогонной бензиновой фракции нефти. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия*. 2022. Т. 15. № 4. С. 486–495. DOI: 10.17516/1998-2836-0311.
16. **Sharifi K., Halladj R., Royae S.J.** An overview on the effects of metal promoters and acidity of ZSM-5 in performance of the aromatization of liquid hydrocarbons. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2020. V. 59. P. 188–206. DOI: 10.1515/rams-2020-0037.
17. **Коробицына Л.Л., Величкина Л.М., Будаев Ж.Б., Шоллидодов М.Р.** Исследование влияния способа получения цеолита структурного типа MFI на его каталитическую активность в процессах переработки углеводородного сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 50–57. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.4t.
18. **Величкина Л.М., Барбашин Я.Е.** Влияние постсинтетической щелочной обработки и модифицирования нанопорошком никеля на свойства цеолитного катализатора облагораживания бензина. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2024. Т. 32. № 2. С. 131–138. DOI: 10.15372/KhUR2024539.
19. **Величкина Л.М., Герасимов Е.Ю., Восмериков А.В.** Исследование совместного влияния постсинтетической щелочной обработки и модифицирования никелем цеолита типа MFI на динамику его дезактивации в процессе
8. **Makhmudov M.Ja., Naubeev T.Kh., Dosnazarov A.B.** Motor gasoline production that meets the environmental requirements of the European standart for benzene content. *Zasch. Okr. Sredy Neftegaz. Komplekse*. 2021. N 1. P. 42–45 (in Russian). DOI: 10.33285/2411-7013-2021-1(298)-42-45.
9. **Smolenskaya N.M., Smolenskii V.V.** Toxicity of Exhaust Gases in Gasoline Engines Powered with Compressed Natural Gas and Gasoline. *Vestn. YuUrGU. Ser. Mashinost.* 2018. V. 18. N 4. P. 57–65 (in Russian). DOI: 10.14529/engin180406.
10. **Yasashin V.A., Martynova E.I.** Assessment of quality characteristics of oil and petroleum products. *Oborud. Tekhnol. Neftegaz. Kompl.* 2021. N 2. P. 35–42 (in Russian). DOI: 10.33285/1999-6934-2021-2(122)-35-42.
11. **Erofeev V.I., Khomyakov I.S., Egorova L.A.** Production of high-octane gasoline from straight-run gasoline on ZSM-5 modified zeolites. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 1. P. 71–76. DOI: 10.1134/S0040579514010023.
12. **Altynov A.A., Bogdanov I.A., Belinskaya N.S., Popok E.V., Kirgina M.V.** Production of automobile gasolines with stable gas condensate and of zeoforming prozess products as mixture components. *Neftegaz. Delo*. 2019. N 2. P. 217–242 (in Russian). DOI: 10.17122/ogbus-2019-2-217-242.
13. **Barilchuk M., Rostanin N.N., Sergeeva K.A.** Conversion of gasoline fractions into components of gasoline based on zeolite-containing catalysts. *Ekspozitsiya Neft' Gaz*. 2024. N 2. P. 60–64 (in Russian). DOI: 10.24412/2076-6785-2024-2-60-64.
14. **Kirgina M., Belinskaya N., Altynov A., Bogdanov I., Temirbolat A.** Transformations of stable gas condensate hydrocarbons into high-octane gasoline components over ZSM-5 zeolite catalyst. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2020. V. 84. P. 103605. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103605.
15. **Velichkina L.M., Barbashin Y.E., Vosmerikov A.V.** Effect of alkaline treatment on physicochemical and catalytic properties of ZSM 5 zeolite during conversion of straight-run gasoline oil fraction. *J. Sib. Fed. Univ. Chem.* 2022. V. 15. N 4. P. 486–495 (in Russian). DOI: 10.17516/1998-2836-0311.
16. **Sharifi K., Halladj R., Royae S.J.** An overview on the effects of metal promoters and acidity of ZSM-5 in performance of the aromatization of liquid hydrocarbons. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2020. V. 59. P. 188–206. DOI: 10.1515/rams-2020-0037.
17. **Korobitsyna L.L., Velichkina L.M., Budaev Zh.B., Sholidodov M.R.** Investigation of the influence of the method for obtaining zeolite of the structural type MFI on its catalytic activity in the processing of hydrocarbon raw materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 50–57 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.4t.
18. **Velichkina L.M., Barbashin Ya.E.** The Influence of Postsynthetic Alkaline Treatment and Modification with Nickel Nanopowder on the Properties of a Zeolite Catalyst for Gasoline Upgrading. *Chem. Sust. Dev.* 2024. V. 32. N 2. P. 127–133. DOI: 10.15372/CSD2024539.
19. **Velichkina L.M., Gerasimov E.Yu., Vosmerikov A.V.** Study of the combined effect of post-synthetic alkaline treatment and nickel modification of MFI zeolite on the dynamics of its deactivation in the process of refining straight-run gasoline. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 8. P. 103–112 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.10t.

- облагораживания прямогонного бензина. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 8. С. 103–112. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.10t.
20. **Кунин А.В., Ильин А.А., Морозов Л.Н., Смирнов Н.Н., Никифорова Т.Е., Прозоров Д.А., Румянцев Р.Н., Афинеевский А.В., Борисова О.А., Гришин И.С., Верес К.А., Курникова А.А., Габрин В.А., Гордина Н.Е.** Катализаторы и адсорбенты для переработки природного газа, производства минеральных удобрений, очистки технологических жидкостей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 132–150. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6849j.
 21. **Сандан Н.Т., Саая К.С., Монгуш Э.С.** Влияние горючего и смазочных материалов на эксплуатацию наземных транспортно-технологических машин. *Вестн. Тувин. Гос. ун-та. Техн. и физ.-мат. науки*. 2021. № 1. С. 32–42. DOI: 10.24411/2221-0458-2021-74-32-42.
 22. **Гужин И.Н., Приказчиков М.С.** Исследование фракционного состава автомобильного бензина. *Самара АгроВектор*. 2022. Т. 2. № 3. С. 29–34. DOI: 10.55170/29493536_2022_2_3_29.
 23. **Nikolaev V.F., Zalaltdinova N.D., Vyachkileva I.O., Fakhrutdinov R.Z., Abakumova O.O., Sulaiman B.** Mapping technique for oil refining processes and products. *Fuel*. 2022. V. 307. P. 121870. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121870.
 24. **Рахимов М.Н., Вильданов Ф.Ш., Фаррахов С.В., Якупов М.М.** Анализ теплотворной способности высокооктановых компонентов автомобильных бензинов. *Башкир. хим. журн.* 2023. Т. 30. № 3. С. 91–96. DOI: 10.17122/bcj-2023-3-91-96.
 25. **Шаталов К.В.** Практические рекомендации по реализации процедуры определения октановых чисел автомобильных бензинов. *Юж.-Сиб. науч. вестн.* 2022. № 2. С. 3–21. DOI: 10.25699/SSSB.2022.42.2.017.
 26. **Чернышева Е.А., Кожевникова Ю.В., Сердюкова Е.Ю., Столоногова Т.И.** Исследование возможности расширения компонентного состава для производства автомобильных бензинов. *Технологии нефти и газа*. 2020. № 5. С. 11–17. DOI: 10.32935/1815-2600-2020-130-5-11-17.
 27. ГОСТ 32513-2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200108179> (дата обращения: 18.01.2024).
 20. **Kunin A.V., Ilyin A.A., Morozov L.N., Smirnov N.N., Nikiforova T.E., Prozorov D.A., Rumyantsev R.N., Afineevskiy A.V., Borisova O.A., Grishin I.S., Veres K.A., Kurnikova A.A., Gabrin V.A., Gordina N.E.** Catalysts and adsorbents for conversion of natural gas, fertilizers production, purification of technological liquids. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 132–150 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6849j.
 21. **Sandan N.T., Saaya K.S., Mongush E.S.** Influence of fuels and lubricants on the operation of ground transportation and technological machines. *Vestn. Tuvin. Gos. Univ. Tekhn. Fiz.-Mat. nauki*. 2021. N 1. P. 32–42 (in Russian). DOI: 10.24411/2221-0458-2021-74-32-42.
 22. **Guzhin I.N., Prikazchikov M.S.** Automotive gasoline fractional composition studies. *Samara AgroVektor*. 2022. V. 2. N 3. P. 29–34 (in Russian). DOI: 10.55170/29493536_2022_2_3_29.
 23. **Nikolaev V.F., Zalaltdinova N.D., Vyachkileva I.O., Fakhrutdinov R.Z., Abakumova O.O., Sulaiman B.** Mapping technique for oil refining processes and products. *Fuel*. 2022. V. 307. P. 121870. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121870.
 24. **Rakhimov M.N., Vildanov F.Sh., Farrakhov S.V., Yakupov M.M.** Analysis of the heating value of high-octane components of motor gasolines. *Baskir. Khim. Zhurn.* 2023. V. 30. N 3. P. 91–96 (in Russian). DOI: 10.17122/bcj-2023-3-91-96.
 25. **Shatalov K.V.** Practical guidance for implementation of procedure that determines octane number in gasoline. *Yuzh.-Sib. Nauch. Vestn.* 2022. N 2. P. 3–21 (in Russian). DOI: 10.25699/SSSB.2022.42.2.017.
 26. **Chernysheva E.A., Kozhevnikova Yu.V., Serdyukova E.Yu., Stolonogova T.I.** The Research of Expanding of Component Composition for Production of Gasoline. *Tekhnol. Nefti Gaza*. 2020. N 5. P. 11–17 (in Russian). DOI: 10.32935/1815-2600-2020-130-5-11-17.
 27. GOST 32513-2013. Automotive fuels. Unleaded petrol. Specifications [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108179> (accessed 18.01.2024) (in Russian).

Поступила в редакцию 29.11.2024

Принята к опубликованию 28.01.2025

Received 29.11.2024

Accepted 28.01.2025