

Е. О. Жилкина (к.х.н., доц.), Д. А. Жилкин (асп.), А. В. Моисеев (к.х.н., доц.),
Г. О. Голиков (магистрант), Н. М. Максимов (д.х.н, проф.), В. А. Тыщенко (д.т.н, проф., зав. каф.)

СОВРЕМЕННЫЕ И ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ИЗОМЕРИЗАЦИИ

Самарский государственный технический университет,
кафедра «Химическая технология переработки нефти и газа»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244; e-mail: eozhilkina@mail.ru

E. O. Zhilkina, D. A. Zhilkin, A. V. Moiseev, G. O. Golikov, N. M. Maximov, V. A. Tyshchenko

MODERN AND HIGH-POTENTIAL TECHNOLOGIES OF CATALYTIC ISOMERIZATION

Samara State Technical University
443100, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244; e-mail: eozhilkina@mail.ru

Представлен обзор технологий каталитической изомеризации, наиболее широко используемых в России и за рубежом с точки зрения возможности применения наиболее технологически апробированных катализаторов и процессов предприятиями нефтеперерабатывающего профиля. Рассмотрены примеры уже внедренных новых технологий и показаны практические результаты, свидетельствующие об их эффективности. Выявлены перспективные направления совершенствования каталитических систем и путей управления процессом, включающие инновационные и нестандартные решения, применение которых позволит выйти за рамки существующих ограничений эффективности. Показаны возможности интенсификации изомеризации с учетом необходимости нефтеперерабатывающих предприятий в импортозамещении.

Ключевые слова: каталитическая изомеризация; современные процессы изомеризации; технология производства высокооктанового компонента бензина

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FSSE-2026-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета

Современный этап развития нефтеперерабатывающей промышленности России характеризуется тем, что реализация модернизационных проектов осложняется ограничением зарубежных поставок оборудования, катализаторов и программного обеспечения для нефтепереработки, а также экономическими факторами, связанными с ценовой политикой в области нефти и нефтепродуктов.

Дата поступления 18.12.25

This article presents an overview of the catalytic isomerization technologies most widely used in Russia and abroad, focusing on the feasibility of using the most technologically proven catalysts and processes in oil refining companies. Examples of new technologies already implemented are discussed, and practical results demonstrating their effectiveness are presented. Promising areas for improving catalytic systems and process control methods are identified, including innovative and unconventional solutions whose application will allow for exceeding existing efficiency limitations. Potential for isomerization intensification is demonstrated, taking into account the need for oil refineries to achieve import substitution.

Key words: catalytic isomerization; modern isomerization processes; production technology of high-octane gasoline component

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSSE-2026-0003) as part of the state task of the Samara State Technical University

На сегодняшний день также актуальна проблема, связанная с постоянным ужесточением требований к качеству моторных топлив. В России при производстве автомобильных бензинов одним из основных компонентов является катализатор риформинга, в котором высокие октановые числа достигаются за счет присутствия ароматических углеводородов. Известно, что по современным требованиям содержание ароматических уг-

леводородов в автобензинах имеет жесткие ограничения. Чтобы выполнить данное требование к качеству продукции, бензины помимо риформатов компаундируются с использованием изомеризаторов, алкилатов, а также оксигенатов, таких как ЭТБЭ, МТБЭ, МТАЭ, но не все российские нефтеперерабатывающие предприятия имеют сырьевую и материальную базу для производства алкилатов и оксигенатов. Необходимо также отметить, что оксигенаты – это кислородсодержащие соединения, а для современных бензинов существуют ограничения по их содержанию.

В настоящее время для производства товарных автомобильных бензинов наиболее широко-масштабное развитие получил процесс каталитической изомеризации. Изомеризаты имеют высокие октановые числа, но в них отсутствуют ароматические углеводороды, что относит катализаторы изомеризации к экологически чистым компонентам. Высокие октановые числа продуктов изомеризации достигаются за счет каталитического превращения парафинов нормального строения в соответствующие изомеры. В процессе изомеризации линейные парафиновые углеводороды трансформируются в разветвленные структуры, что позволяет значительно повысить октановые числа легкокипящих бензинов ¹.

Следовательно, получение изомеризата на нефтеперерабатывающем предприятии является оптимальным решением, т.к. изомеризат отвечает всем экологическим требованиям и не имеет каких-либо ограничений при компаундировании товарных бензинов.

Впервые экспериментальные данные по изомеризации линейных углеводородов были опубли-

кованы в 1933 г. К. Неницеску и А. Драган, они провели изомеризацию нормального гексана и нормального гептана с использованием хлорида алюминия в качестве катализатора. В 1935 г. Б.Л. Молдавский показал возможность применения хлористого водорода для промотирования катализаторов изомеризации, а В.Н. Ипатьев в 1936 г. изомеризовал нормальный бутан в изобутан с помощью хлорида алюминия, который промотировался хлористым водородом ¹.

В настоящее время день среди промышленных процессов различают три варианта каталитической изомеризации:

– высокотемпературная изомеризация (360–440 °С) на алюмоплатиновых фторированных катализаторах;

– среднетемпературная изомеризация (250–300 °С) на цеолитных катализаторах;

низкотемпературная изомеризация (180–210 °С), осуществляющаяся на сульфатированных оксидах металлов, а также изомеризация при температуре 120–180 °С, протекающая на оксиде алюминия, промотированном хлором.

Вышеперечисленные варианты аналогичны по оформлению. Главные различия заключаются в применяемых катализаторах. Температура процесса также играет значительную роль, т.к. от нее зависит октановое число производимого изомеризата. В табл. 1 приведены различные типы катализаторов изомеризации и технологии, разработанные на их основе ¹.

В литературе уделяется внимание расширению сырьевой базы процесса каталитической изомеризации. Так, в работе ² предлагается направлять на изомеризацию фракцию н.к.–62 °С, полу-

Таблица 1

Типы катализаторов процесса изомеризации и технологии, разработанные на их основе

Тип катализатора	Характеристика катализаторов различных типов	Марки различных типов катализаторов и фирмы-разработчики технологий, базирующихся на их основе
На основе цеолитов	В отличие от других катализаторов работают при более высоких температурах, и полученные октановые числа продукта сравнительно низкие, однако катализаторы данного типа подвергаются полной регенерации и не чувствительны к каталитическим ядам сырья	HS-10 – UOP; IP-632 – Axens, Hysopar; СИ-1 – ООО «НПП Нефтехим»; СИП-2А – ООО «НПФ Олкат».
На основе оксида алюминия, промотированного хлором	Обладают повышенной активностью, что способствует высокому выходу и высоким октановым числам катализата, однако в ходе процесса снижается содержание хлора и, следовательно, активность, чувствителен к каталитическим ядам, требуется обязательная гидроочистка и осушка сырья. Катализатор не регенерируется	I-82, I-84 – UOP; ATIS-2L – Axens, Akzo Nobel; НИП-3А – ООО «НПФ Олкат».
С содержанием сульфатированных оксидов металлов	Сочетают в себе достоинства средне- и высокотемпературных катализаторов: повышенная активность и устойчивость к каталитическим ядам, способность к полной регенерации	LPT-100, PI-242 – UOP; СИ-2 – ООО «НПП Нефтехим» ²

ченную с верха фракционирующей колонны блока выделения бензолсодержащей фракции установки каталитического риформинга. Эту фракцию нецелесообразно смешивать с риформатом. т.к. ее присутствие в риформате снижает ОЧ последнего и увеличивает его давление насыщенных паров. Предложена модифицированная схема процесса.

Необходимо отметить интерес исследователей к каталитическим системам, позволяющим изомеризовать углеводороды нормального строения гептановой фракции. Интерес обоснован тем, что на сегодняшний день наблюдается тенденция вовлечения гептановой фракции в сырье риформинга на установках НПЗ. Однако большая часть углеводородов гептановой фракции в условиях каталитического риформинга не участвует в целевых реакциях, а подвергается гидрокрекингу, что в дальнейшем приводит к снижению выхода водорода за счет расходования последнего на нецелевые реакции и разбавление углеводородными газами. Таким образом, целесообразно выделить гептановую фракцию с дальнейшей квалифицированной ее переработкой.

В работах зарубежных авторов рассматриваются различные варианты каталитических систем, позволяющих изомеризовать *n*-гептан: микромезопористый композит Beta-SBA-15³; бифункциональный катализатор с капсулированием наночастиц палладия внутри цеолитов⁴; композитный катализатор $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2\text{-SAPO-11}$, полученный в результате роста UiO-66 на SAPO-11⁵. Российские ученые также проводили исследования, направленные на разработку каталитических систем для изомеризации C_7 -фракции. Так, в работе⁶ рассмотрена новая тенденция в разработке катализаторов на твердокислотной основе, применяемых для изомеризации C_7 -углеводородов. Подобные катализаторы синтезируются с помощью неорганических оксокомплексов. В результате синтеза получен ряд гетерокомплексов смешанного состава с модифицированной структурой Кеггина, в которой содержатся переходные металлы (в частности платиноиды), а также представлена технология получения нанесенных суперкислотных катализаторов с активной фазой на основе модифицированных гетерополикомплексов Кеггиновского ряда. Было показано⁷, что нанесенные вольфраматциркониевые катализаторы ($\text{Pd}/\text{WZr}/\text{Al}_2\text{O}_3$) катализаторы показывают значительное увеличение активности при изменении фазового состава носителя с сочетания θ - и δ - Al_2O_3 на сочетание θ - и α - Al_2O_3 из-за увеличения концентрации кислотных центров. Это проявляется в смещении температурных зависимостей конверсии гептана в область более низких температур (на 10–30 °C). Необходимо отметить, что

промышленной реализации данные технологии не получили.

В настоящее время продолжают исследования в области разработки каталитических систем для изомеризации легкокипящих нормальных углеводородов. В работе⁸ рассмотрена синтезированная на основе Со-модифицированного цеолита H-ZSM-5 и сульфатированного диоксида циркония композитная каталитическая система. Исследованы превращения *n*-бутана, *n*-гексана и *n*-гептана, их смеси и газового бензина на данном катализаторе. Установлено, что при контакте с катализатором эти алканы подвергаются изомеризации и диспропорционированию, а также происходит изомеризация газового бензина. Биметаллические (Pt и Ge) бицеолитные (Y и ZSM-5) катализаторы демонстрируют⁹ повышенную изомеризующую активность и обеспечивают высокие выходы изогексанов и снижение содержания бензола в катализате.

Биметаллические катализаторы представляют собой перспективное направление исследований в нефтепереработке, позволяющее повысить эффективность процессов изомеризации алканов и улучшить качество топлива. Их преимущества по сравнению с монометаллическими аналогами - повышенная активность, селективность, стабильность и долговечность из-за синергетического эффекта между металлами. Они улучшают дисперсность активных компонентов, кислотность по Льюису и баланс между активными компонентами и носителем.

Применение биметаллических катализаторов способствует снижению вредных выбросов и повышению качества топлива: увеличение доли изогексанов увеличивает октановое число и снижает потребность в ароматических добавках.

Установлено¹⁰, что добавление железа в биметаллические катализаторы на основе цеолита типа ZSM-5 увеличивает ароматизирующую активность катализатора, а совместное использование железа и фосфора увеличивает выход жидких продуктов, добавление меди и никеля повышает изомеризующую активность катализатора. При введении модифицирующих добавок происходит снижение концентрации сильных бренstedовских кислотных центров и образование сильных Льюисовских кислотных центров типа $\text{Me}^{n+}\cdot\text{O}^-$. Оптимальный состав катализатора, который обеспечивает высокий выход жидких продуктов и высокое октановое число – 0.5% Ni, 3% Fe, 2% P/ZSM-5.

Авторами¹¹ исследованы новые микро-мезопористые катализаторы на основе деалюминированных нанотрубок галлузита и цеолита ZSM-5 для изомеризации ароматической фракции C_8 . Основное внимание уделено улучшению свойств катализатора за счет увеличения количества и

силы кислотных центров, а также оптимизации текстурных и структурных характеристик. Экспериментальные данные показывают, что разработанный катализатор превосходит промышленные аналоги по эффективности превращения этилбензола и селективности в отношении параксилола.

В статье ¹² рассматриваются различные методы синтеза ZSM-5, включая традиционные гидротермальные процессы, новые органические структурообразующие добавки и альтернативные подходы без органических темплатов. Описаны ключевые аспекты влияния условий синтеза на структуру, кислотность и каталитические свойства цеолита. Приводятся исследования структуры цеолита, такие как наличие каркасных центров алюминия и взаимодействие между ними и органическими молекулами-темплатами. Отдельное внимание уделено использованию недорогих предшественников, таких как зола угля и рисовая шелуха, для экономически эффективного производства ZSM-5. Подчеркивается перспективность дальнейших исследований и разработок новых методов синтеза и модификации свойств ZSM-5 для расширения областей его применения.

Органический агент служит для формирования правильной структуры каркаса. Обычно это тетрапропиламмониевые соли (TPA) или другие аминоподобные соединения, которые направляют рост структуры типа MFI (топология ZSM-5).

Каркас цеолита ZSM-5 состоит из цепей тетраэдров кремния и алюминия, соединенных вместе таким образом, что образуется трехмерная сеть каналов, также характеризуется наличием двух типов параллельных межканальных путей: один канал проходит параллельно оси (прямолинейный канал диаметром примерно 5.3 Å), другой – вдоль оси (зигзагообразный канал шириной около 5.1 Å). Наличие уникальных прямолинейных и зигзагообразных каналов дает возможность селективного прохождения молекул разного размера и формы. Каналы достаточно узкие (около 5–6 Å), что ограничивает прохождение крупных молекул, обеспечивая высокую селективность процесса. Благодаря небольшой плотности упаковки атомов в канале, структура проявляет определенную подвижность и способность адаптироваться к различным условиям.

В исследовании ¹³ изучены методы синтеза, структуры и регулирования кислотности цеолитов типа ZSM-12, используемых в процессах изомеризации алканов. Основное внимание уделено влиянию различных методов синтеза и структурных особенностей на каталитические свойства цеолитов, включая морфологию кристаллов, пористую структуру и распределение активных центров кислот. Рассматриваются различные подходы к регулированию кислотности, такие как метод пред-

варительного геля, замещение атомов в структуре цеолита, ионнообменные методы и другие варианты модификации поверхности материала. Подчеркивается важность контроля распределения Бренстедовских и Льюисовских кислотных центров для повышения эффективности процессов изомеризации, особенно в отношении образования разветвленных изомеров. Описаны механизмы реакции изомеризации и роль цеолитов в превращении *n*-алканов в высокооктановое топливо и смазочные масла высокого качества. Приводятся конкретные экспериментальные данные и сравнительные исследования различных типов цеолитов, демонстрирующие влияние состава и условий синтеза на производительность катализаторов.

Цеолит ZSM-12 эффективен в процессах изомеризации длинноцепочечных алканов, показывает высокую активность и стабильность в условиях гидрообработки.

Преимущества ZSM-12:

1. Структура: обладает одной направленной системой пор и топологией MTW, что обеспечивает эффективное проникновение длинных цепей алканов внутрь пористой структуры.

2. Регулируемость: позволяет контролировать размер пор, кислотность и морфологию путем изменения условий синтеза, что делает его гибким материалом для оптимизации реакций.

3. Кислотность: возможность регулировать плотность и силу Бренстедовых и Льюисовских кислотных центров, что критически важно для улучшения селективности и выхода целевых продуктов.

4. Катализаторы на основе ZSM-12 демонстрируют высокую активность и стабильность в реакциях изомеризации, обеспечивая образование высокоразветвленных изомеров, что повышает октановое число топлива и улучшает качество масел.

Таким образом, цеолит ZSM-12 является одним из наиболее перспективных и широко исследуемых материалов для применения в процессе изомеризации алканов ¹³.

Одним из перспективных направлений разработки катализаторов процесса изомеризации *n*-алканов является разработка каталитических систем, включающих композиции оксидов металлов и нанесенной на них платины. В литературе имеются сведения о разработанном японскими учеными катализатором, в состав которого входит вольфрамизированный диоксид циркония (Pt/WO₃-ZrO₂). В реакции изомеризации нормальных парафинов данный катализатор, по исследованиям разработчиков, имеет повышенную по сравнению с катализаторами на основе сульфатированного оксида циркония селективность и активность ¹⁴.

Аналогично катализаторы на основе вольфраматсодержащего диоксида циркония (Pt/WZr) с содержанием WO_3 15–20 % мас. демонстрируют высокую активность в изомеризации *n*-гексана и *n*-гептана при умеренных температурах (170–220 °C). Их преимущества включают повышенную селективность, экологичность, возможность работы в мягких условиях и устойчивость к дезактивации¹⁵.

Исследования¹⁶ показали, что условия осаждения и старения гидрата диоксида циркония ($\text{ZrO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) существенно влияют на его пористую структуру и фазовый состав. Оптимальные условия синтеза, такие как осаждение при постоянном pH и старение при 90 °C в течение 12 ч, позволяют достичь высокой удельной поверхности (140 м²/г) и объема пор (0.404 см³/г). Старение при повышенных температурах (80–100 °C) способствует формированию развитой пористой структуры, предотвращая уплотнение материала. Однако повышение температуры до 120 °C может привести к агрегации частиц и снижению доступности активных центров.

Для улучшения свойств ZrO_2 применяются различные методы модификации. Добавление оксидов церия (CeO_2), иттрия (Y_2O_3) и кальция (CaO) стабилизируют фазы ZrO_2 , повышают механическую прочность и каталитическую активность. Комбинация ZrO_2 с углеродными материалами или керамическими наполнителями улучшает теплопроводность и устойчивость к износу¹⁶.

Что касается создания пористой структуры, то использование золь-гель метода и темплатного формирования пор позволяет контролировать текстуру материала, что критически важно для каталитических целей¹⁷.

Исследования показали^{18, 19}, что катализатор на основе сульфатированного оксида циркония (Pd-SZ) обладает высокой активностью и селективностью в процессе изомеризации легких бензиновых фракций, что позволяет снизить температуру процесса до 125–150 °C. Pd-SZ превосходит промышленные аналоги, такие как LPI-100TM, Pt-Cl/ Al_2O_3 и российский катализатор СИ-2, по следующим параметрам: более низкая температура процесса, повышенное октановое число конечного продукта, устойчивость к отравлению каталитическими ядами и возможность регенерации. Наибольшую активность показал¹⁹ Pt/SZ/ Al_2O_3 (Sn) катализатор с добавкой гидроксида олова, который способствует формированию мелких частиц диоксида циркония (3.2 нм) и обеспечивает выход изомеров *n*-гексана до 85.3% при 180 °C.

Катализаторы, содержащие сульфатированный ZrO_2 , нанесенный на оксид алюминия, показывают более высокую активность и эффективность в изомеризации гексана, обеспечивая высо-

кие выходы высокооктановых производных гексана (2,2-диметилбутан) по сравнению с аналогичными системами на оксиде кремния благодаря большому количеству Льюисовских кислотных центров²⁰. Фторирование оксида алюминия (3.7% мас. F) увеличивает кислотность и активность катализаторов, а добавки железа и марганца способствуют формированию Льюисовских кислотных центров, увеличивая выход высокооктановых изомеров^{21, 22}.

Исследования бифункциональных катализаторов на основе Pt-Ti-MSU и Al-Ti-MSU показали²³, что оптимальная активность и селективность в изомеризации *n*-гептана достигаются при использовании катализатора с содержанием 1% Pt-Al-Ti-MSU с соотношением Si/Ti=10% и Si/Al=10%. Этот катализатор демонстрирует высокую конверсию даже при умеренных температурах (250 °C), что делает его перспективным для промышленного применения.

Модификация цирконием, цинком, фосфором биметаллических цинксодержащих катализаторов изомеризации прямогонной бензиновой фракции приводит к снижению концентрации сильных бренстедовских кислотных центров, увеличению активности в реакциях ароматизации и изменению углеводородного состава продуктов реакции. В результате экспериментов²⁴ было выявлено, что наилучшие результаты показал катализатор, содержащий 1.5% циркония, 3% цинка и H-US, который позволяет получать компонент бензина с октановым числом 87.0 и выходом жидкого катализата 78.2% при температуре 380 °C.

Морденит представляет собой природное соединение группы цеолитов, имеющее развитую пористую структуру с большой площадью внутренней поверхности. Его химический состав включает оксиды кремния (SiO_2) и алюминия (Al_2O_3), организованные в виде регулярной кристаллической сетки. Деалюминирование морденита улучшает его каталитические свойства, увеличивая количество сильных Бренстедовских кислотных центров и улучшая пористую структуру. Наибольшую активность в изомеризации *n*-пентана, *n*-гексана и легкой нефти показал образец с отношением $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 40$ ²⁵.

В работе²⁶ изучалось влияние концентрации палладия и добавления морденита на активность и селективность катализаторов на основе палладиевого золя, нанесенного на активированный монтмориллонит в натриевой форме (NaHMM) в реакции изомеризации *n*-гексана. Оптимальное содержание палладия в катализаторе составляет 0.35%, обеспечивая максимальную конверсию *n*-гексана (до 52.6%). Добавление морденита приводит к увеличению конверсии и селективности,

особенно при низких концентрациях палладия. Также морденит повышает удельную поверхность катализатора, увеличивая доступность активных центров и интенсифицируя диффузию.

Ионные жидкости также применяются в качестве катализаторов процесса изомеризации легких нормальных углеводородов. Низкая температура начала проявления каталитической активности – один из определяющих факторов рассмотрения ионных жидкостей как катализаторов в нефтепереработке, в частности, в процессе изомеризации, эффективно протекающем при невысоких температурах. Ионные жидкости – это соли, имеющие в своем составе органический катион и неорганический анион, причем температура плавления подобных солей ниже 100 °С. Они имеют высокую кислотность и как следствие проявляют активность в реакциях изомеризации углеводородного сырья.

Авторами работы ²⁷ установлено, что ионная жидкость триэтиламин гидрохлорид-хлорид алюминия в соотношении компонентов 1:2 проявляет максимальную активность в реакциях изомеризации *n*-гексана (температура процесса 80 °С). Однако в настоящее время применение подобных катализаторов в промышленности не реализовано. В работе ²⁸ представлены результаты изучения особенностей процесса изомеризации легких углеводородов с целью получения высокооктановых компонентов бензиновых топлив в среде суперкислотных катализаторов на основе ионной жидкости триметиламин гидрохлорид-хлорид алюминия с добавлением различных солей. В работе исследованы некоторые физико-химические свойства полученных каталитических систем: плотность, вязкость, температурная стабильность. Также выявлены закономерности влияния физико-химических свойств катализаторов, а также параметров проведения эксперимента на каталитическую активность систем. Работа ²⁹ посвящена изучению каталитической активности суперкислотных катализаторов на основе ионной жидкости «триэтиламин гидрохлорид-хлорид алюминия» для процесса изомеризации углеводородов, входящих в состав легких бензиновых фракций с целью получения разветвленных структур, способствующих повышению октанового числа. Выявлены предельные концентрации тиофена, воды и бензола в сырье изомеризации, дано обоснование действия сокатализатора на ионную жидкость. Приведены данные о термической стабильности исследуемых каталитических систем.

Опубликованы работы, где описана каталитическая изомеризация гексана при помощи СВЧ-установки ^{30, 31}. Суть микроволнового (СВЧ) катализа заключается в том, что на систему катализатор–реагенты оказывается объемное уп-

равляемое электромагнитное воздействие, которое приводит к повышению эффективности работы катализатора, его стабильности и селективности превращения сырья в ценные продукты.

Статья ³² посвящена изучению металлоорганических каркасов (МОК) в качестве катализаторов изомеризации, которые представляют собой новую группу кристаллических материалов, состоящих из органических лигандов, координированных с металлическими ионами в кластерной форме. МОК привлекают внимание благодаря своей структурной универсальности, увеличенной площади поверхности, регулируемым размерам пор и функциональности.

В работе ³³ в качестве катализаторов изомеризации рассматриваются расплавленные соли NaCl-AlCl₃ и NaCl-ZnCl₂. Оптимальная температура процесса составляет около 540–550 °С. При более высоких температурах наблюдается снижение октанового числа из-за разложения высокооктановых компонентов. Лучшие результаты продемонстрировал катализатор NaCl-ZnCl₂, который увеличил октановое число с 60 до 93 пунктов, в то время как NaCl-AlCl₃ – до 89 пунктов. Катализатор NaCl-ZnCl₂ полностью преобразует легкие и тяжелые компоненты нефти, тогда как NaCl-AlCl₃ менее эффективен для тяжелых фракций.

Существуют дополнительные способы, направленные на повышение качества продукта и снижение затрат на сырье ¹²:

1. Рециклинг отходов. Использование золунос угольных электростанций, рисовой шелухи и других дешевых природных материалов в качестве сырья для синтеза значительно сокращает затраты на производство.

2. Применение ионотропных солей. Вместо обычных органических агентов используются ионные жидкости, обеспечивающие контролируемое развитие структуры цеолита и устойчивость готового продукта.

В настоящее время в России разработан катализатор изомеризации гептановых фракций СИ-4, который представляет собой композицию оксидов металлов $aAl_2O_3 \cdot bZrO_2 \cdot cWO_3 \cdot dTiO_2 \cdot eMnO_2$ и нанесенной на него Pt (0.25%). Ниже представлены уникальные свойства СИ-4:

- катализатор характеризуется повышенной селективной способностью при изомеризации C₇-парафинов;
- не требует подачи реагентов в процессе эксплуатации;
- обладает высокой стабильностью и устойчивостью к каталитическим ядам;
- обеспечивает проведение селективного процесса изомеризации гептанов при температурах от 160 °С;

- срок службы катализатора 10 лет;
- катализатор регенерируется непосредственно в реакторе;
- катализатор российского происхождения.

Его промышленное производство реализуется в Нижнем Новгороде ³⁴.

Как уже было сказано выше, технологические схемы процесса изомеризации имеют много общего. В основном они различаются температурой и используемым катализатором. Различие также может заключаться применяемой системой ректификации углеводородов (наличие колонн деизопентанизации, деизогексанизации и т. д.), что позволяет повышать ИОЧ изомеризата за счет применения рециклов, предварительной подготовки сырья (удаление изомерных углеводородов) и т.д. Такие приемы позволяют увеличить ИОЧ изомеризата с 80 пунктов (схема «за проход») до 90–92 пунктов (предварительная деизопентанизация сырья и рециркуляции нормальных углеводородов).

На современном этапе развития нефтеперерабатывающей промышленности варианты технологий процесса каталитической изомеризации в основном представлены процессами TIR, Penex, Par-Isom (UOP), Ipsorb, Hesorb (Axens), Nysopar (Sud-Chemie), а также отечественными процессами Изомалк-2 и Изомалк-4, разработчиками которых является НПП «Нефтехим». Краткие характеристики наиболее распространенных процессов представлены в табл. 2 ^{1, 34, 35}.

В настоящее время одним из основных путей интенсификации процесса каталитической изомеризации является разработка перспективных каталитических систем низкотемпературного варианта процесса, и все большую актуальность приобретет импортозамещение зарубежных технологий отечественными разработками.

В перспективе в России прогнозируется рост числа установок низкотемпературной изомеризации в 2 раза, причем первое место по уровню внедрения на российских НПЗ занимает технология «Изомалк-2» (12 установок) ³⁴. При реализации этой технологии применяется катализатор СИ-2. Данный катализатор обладает рядом существенных преимуществ в сравнении с ранее используемыми.

Согласно ³⁶, лучшим выбором для процесса изомеризации является катализатор СИ-2Б российского производства. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с зарубежным аналогом ATIS-2L (Axens), такими как высокая объемная скорость подачи сырья, что позволяет уменьшить объем реакционной зоны и размеры реактора без снижения октанового числа, высокий коэффициент прочности, возможность регенерации, отсутствие необходимости подачи хлорорганики в ре-

акционную зону и обработки щелочью катализата, что устраняет значительные проблемы в эксплуатации процесса, а также увеличенный срок службы катализатора. Эти преимущества делают катализатор СИ-2Б более выгодным и эффективным для применения в установках изомеризации пентан-гексановой фракции.

Следует отметить технологию Изомалк-4, лицензиаром которой является российская компания НПП «Нефтехим». В данной технологии применяется катализатор СИ-4, который обладает уникально высокой селективностью в изомеризации C₇-парафиновых углеводородов. Как было сказано выше, реализация данной технологии позволит увеличить долю экологически чистого компонента в составе товарных бензинов. Компания НПП «Нефтехим» предлагает проекты как строительства новых установок, так и реконструкцию уже действующих под реализацию технологии Изомалк-4 ³⁷. Авторы работы ³⁸ на основании проведенного анализа и расчета с использованием ChemCAD показали возможность реконструкции действующей установки каталитической изомеризации Комсомольского НПЗ на процесс Изомалк-4.

Технология Изомалк-4 внесена в Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 30-2021 и готова к промышленной реализации ³⁹.

Перспективным направлением интенсификации процесса изомеризации является математическое моделирование. Так, авторы работы ⁴⁰ смоделировали процесс изомеризации в программном пакете Aspen Hysys. С помощью модели получены значения производительности установки, ее материальный баланс, описана технологическая схема. Данная программа, по мнению авторов, позволяет адекватно оценивать технологическую среду моделируемого процесса, что уменьшает количество ошибок на производстве. В работе ⁴¹ предложена математическая модель процесса изомеризации пентан-гексановой фракции для мониторинга и прогнозирования работы катализатора СИ-2, совмещенная с модулем оптимизации состава сырья. В работе ⁴² описана лабораторная установка изомеризации гептановой фракции, проведен термодинамический анализ, на основании которого разработана математическая модель процесса изомеризации гептановой фракции. С помощью данной модели возможно рассчитать оптимальные технологические параметры работы установки, что позволит достигнуть необходимых октановых характеристик изомеризата при запланированном выходе в условиях изменения углеводородного состава сырья.

Внедрение в производство разработанных авторами универсальных моделирующих про-

Краткие характеристики процессов изомеризации *n*-парафинов

Наименование процесса	Компания-разработчик	Катализаторы	Особенности технологии
TIP	UOP	Цеолитные	Изомеризация на цеолитных катализаторах Total Isomerization Proces, совмещенная с процессом «IsoSiv» – выделением непрореагировавших <i>n</i> -парафинов на молекулярных ситах и возвращением их в процесс. Данная комбинация позволяет увеличить ИОЧ изомеризата с 78–79 до 87–90 пунктов
Hysopar	Sud-Chemie	Цеолитные	Разработанный катализатор в отличие от аналогичных имеет наибольшую устойчивость к каталитическим ядам, требует минимальную гидроочистку сырья. Технологическая схема сходна со схемой компании UOP «за проход», но разработчики рекомендуют добавить схему колонной выделения изопентана из сырья и рециклом <i>n</i> -пентана и <i>n</i> -гексана
Penex	UOP	Хлорированные алюмооксидные	Не требует циркуляции водорода, достигается высокая конверсия с хорошим выходом при низкой температуре. Реализуется двухреакторная схема, способствующая гибкости процесса. Недостаток – высокая чувствительность к содержанию примесей в сырье (требуется глубокая гидроочистка). Применяемый катализатор имеет непродолжительный срок службы и не регенерируется. Положительные результаты процесса достигаются при совмещении блока изомеризации с деизопентанизатором (ДИП) и супердеизогексанизатором (суперДИГ), что позволяет достичь ИОЧ изомеризата 90–93 пунктов
Технология изомеризации на хлорированном алюмооксидном катализаторе	Ахенс совместно с Akzo Nobel	Хлорированные алюмооксидные	Принципиальная схема подобна аналогичной схеме, предложенной компанией UOP. В качестве модификации компания Ахенс разработала вариант схемы, дополненной адсорбцией <i>n</i> -парафинов на молекулярных ситах (Ipsorb, Hecorb), что позволило получить изомеризат ИОЧ 90–92 пунктов
Parlsom	UOP	Сульфатированный оксидный	Катализаторы процесса менее чувствительны к ядам сырья (по сравнению с хлорированными алюмооксидными), могут регенерироваться. Установка может включать ДИП и рецикл <i>n</i> -пентана и малоразветвленных гексанов (ИОЧ изомеризата – 89-91 пункт). Недостаток – значительные капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с большим количеством рецикловых потоков
Изомалк-2	НПП «Нефтехим»	Сульфатированный оксидный	Применяется катализатор СИ-2. Температурный режим процесса – 130–180 °С, катализатор проявляет повышенную устойчивость к действию каталитических ядов, глубокая очистка сырья не требуется. Технология Изомалк-2 может быть реализована в различных вариантах: использование одного или двух реакторов, схема «за проход» (ИОЧ изомеризата 82–84 пунктов, но минимальные капитальные затраты), схема с рециклом <i>n</i> -пентана (ИОЧ изомеризата 86-88 пунктов), схема с ДИГ (ИОЧ изомеризата 87–88 пунктов), схема с ДИП и ДИГ и рециклом выделенных продуктов (ИОЧ изомеризата 91–92 пунктов, но повышаются капитальные затраты)
Изомалк-4	НПП «Нефтехим»	Композиция оксидов металлов, несulfатированный	Основа технологии – низкотемпературный катализатор СИ-4. Процесс Изомалк-4, в отличие от всех вышеперечисленных технологий, направлен на селективную изомеризацию гептановой фракции, что позволяет расширить экологически благоприятный компонентный состав бензинового пула, минимизировав применение октановых добавок ¹

грамм позволит повысить ресурсоэффективность и энергосбережение таких процессов как каталитический крекинг, риформинг и изомеризация.

Таким образом, процесс каталитической изомеризации в современной нефтеперерабатывающей

промышленности играет значительную роль как источник экологически чистого компонента товарного бензина, а интенсификация этого процесса является одним из приоритетных направлений развития нефтеперерабатывающих предприятий России.

Литература

1. Шакун А.Н., Федорова М.Л., Карпенко Т. В., Демидова Е.В. Развитие процессов изомеризации парафиновых углеводородов // Мир нефтепродуктов. – 2020. – №6. – С. 6-14.
2. Береговский А.А., Попов С.В., Хабибрахманова О.В. Об использовании на установке изомеризации фракции н.к.- 62 блока выделения бензолсодержащей фракции установки каталитического риформинга // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2020. – №11. – С.3-4.
3. Gao L., Shi Z., Etim U.J., Hong M., Li Y., Bai P., Xing E., Yan Z., Liu Z. Superior catalytic performance of micro-mesoporous Beta-SBA-15 composite with a high indexed isomerization factor in hydroisomerization of *n*-heptane // *Fuel*. – 2019. – V.252. – Pp. 653-665.
4. Chen H., Yi F., Ma C., Wang J., Kan Q. Hydroisomerization of *n*-heptane on a new kind of bifunctional catalysts with palladium nanoparticles encapsulating inside zeolites // *Fuel*. – 2020. – V.268. – P.117241
5. Wen C., Xu J., Wang X., Fan Y. *n*-Heptane hydroisomerization over a $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{SAPO-11}$ composite-based catalyst derived from the growth of UiO-66 on SAPO-11 // *Energy & Fuels*. – 2020. – V.34, Is.8. – Pp.9498-9508.
6. Газаров К.Р., Мещеряков С.В., Газаров Р.А., Мкртычан В.Р. Изомеризация *n*-гептана как способ выполнения экологического стандарта Евро-6 на бензины // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2023. – №4(313). – С.26-33.
7. Смоликов М.Д., Шкуренок В.А., Яблокова С.С., Казанцев К.В., Гуляева Т.И., Муромцев И.В., Лавренов А.В. Нанесенные на пористый носитель вольфраматциркониевые катализаторы для изомеризации гептана // Катализ в промышленности. – 2023. – V.23, №5. – С.6-13.
8. Мамедова М.Т. Низкотемпературное изомеризационно-диспропорционирование превращение $\text{C}_4\text{--C}_7$ алканов и газового бензина на композиционном катализаторе // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2022. – №1. – С.41-45.
9. Мамедов С.Э., Ахмедова Н.Ф., Мамедов Э.С., Мирзалиева С.Э., Мамедова А.З. Каталитические свойства биметаллических биеолитных катализаторов в процессе изомеризации узкой бензиновой фракции (62–85 °С) прямогонного бензина // Баш. хим. ж. – 2022. – Т.29, №3. – С. 63-67.
10. Мирзалиева С.Э., Мамедова А.З., Ширинова С.М., Мамедов С.Э., Ахмедова Н.Ф. Кислотные и каталитические свойства биметаллических катализаторов на основе цеолита типа ZSM-5 в облагораживании прямогонной бензиновой фракции // Нефтегазовое дело. – 2019. – №4. – С.155-172.
11. Демихова Н.Р., Боев С.С., Решетина М.В., Черденченко К.А., Винокуров В.А., Глотов А.П. Микро-мезопористый катализатор на основе деалюминированных нанотрубок галлузита для изомеризации ароматической фракции С-8 // Наногетерогенный катализ. – 2021. – Т.6, №2. – С.63-74.
12. Bensafi B., Chouat N., Djafri F. The universal zeolite ZSM-5: Structure and synthesis strategies. A review // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2023. – V.496. – Pp.2153-2197.

References

1. Shakun A.N., Fedorova M.L., Karpenko T.V., Demidova E.V. *Razvitie protsessov izomerizatsii parafinovykh uglevodorodov* [Development of isomerization processes of paraffin hydrocarbons]. *Mir nefteproduktov* [World of Petroleum Products], 2020, no.6, pp.6-14.
2. Beregovskiy A.A., Popov S.V., Khabibrakhmanova O.V. *Ob ispol'zovanii na ustanovke izomerizatsii fraktsii n.k.-62 bloka vydeleniya benzolsoderzhashchei fraktsii ustanovki kataliticheskogo reforminga* [On the use of the IBP-62 fraction at the isomerization unit of the benzene-containing fraction separation unit of the catalytic reforming unit]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt* [Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Advanced Experience], 2020, no.11, pp.3-4.
3. Gao L., Shi Z., Etim U.J., Hong M., Li Y., Bai P., Xing E., Yan Z., Liu Z. [Superior catalytic performance of micro-mesoporous Beta-SBA-15 composite with a high indexed isomerization factor in hydroisomerization of *n*-heptane]. *Fuel*, 2019, vol.252, pp.653-665.
4. Chen H., Yi F., Ma C., Wang J., Kan Q. [Hydroisomerization of *n*-heptane on a new kind of bifunctional catalysts with palladium nanoparticles encapsulating inside zeolites]. *Fuel*, 2020, vol.268, p.117241.
5. Wen C., Xu J., Wang X., Fan Y. [*n*-Heptane hydroisomerization over a $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{SAPO-11}$ composite-based catalyst derived from the growth of UiO-66 on SAPO-11]. *Energy & Fuels*, 2020, vol.34, is.8, pp.9498-9508.
6. Gazarov K.R., Meshcheriakov S.V., Gazarov R.A., Mkrtychan V.R. *Izomerizatsiya n-heptana kak sposob vypolneniya ekologicheskogo standarta Euro-6 na benziny* [Isomerization of *n*-heptane as a way to meet the Euro-6 environmental standard for gasolines]. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in the Oil and Gas Complex], 2023, no.4(313), pp.26-33.
7. Smolikov M.D., Shkurenok V.A., Iablokova S.S., Kazantsev K.V., Gulyaeva T.I., Muromtsev I.V., Lavrenov A.V. *Nanesennye na poristy nositel vol'framatcirkonievye katalizatory dlya izomerizatsii heptana* [Tungsten-zirconium catalysts supported on a porous carrier for heptane isomerization]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2023, vol.23, no.5, pp.6-13.
8. Mamedova M.T. *Nizkotemperaturnoe izomerizatsionno-disproporcionnoe prevrashchenie $\text{C}_4\text{--C}_7$ alkanov i gazovogo benzina na kompozitsionnom katalizatore* [Low-temperature isomerization-disproportionation conversion of $\text{C}_4\text{--C}_7$ alkanes and gas gasoline on a composite catalyst]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt* [Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Advanced Experience], 2022, no.1, pp.41-45.
9. Mamedov S.E., Akhmedova N.F., Mamedov E.S., Mirzalieva S.E., Mamedova A.Z. *Kataliticheskie svoystva bimetallicheskih bitseolitnykh katalizatorov v protsesse izomerizatsii uzkoj benzinovoy fraktsii (62–85 °C) priamogonnogo benzina* [Catalytic properties of bimetallic bizeolite catalysts in the isomerization process of a narrow gasoline fraction (62–85 °C) of straight-run gasoline]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2022, vol.29, no.3, pp.63-67.
10. Mirzalieva S.E., Mamedova A.Z., Shirinova S.M., Mamedov S.E., Akhmedova N.F. *Kislotnye i kataliticheskie svoystva bimetallicheskih katalizatorov na osnove tseolita tipa ZSM-5 v oblagorazhivanii priamogonnoy benzinovoy fraktsii* [Acidic and catalytic

13. Shen Y., Qiao L., Zhang Zh., Gao Sh., Han Y., Liu J., Liu J. Synthesis, structure, and acidity regulation of ZSM-12 zeolite in alkane isomerization // *Fuel*. – 2025. – V.380. – P.133221.
14. Пахомов Н. А. Научные основы приготовления катализаторов: введение в теорию и практику. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 261 с.
15. Смоликов М.Д., Шкуренко В.А., Бикметова Л.И., Леонтьева Н.Н., Лавренов А.В. Совместная изомеризация гексана и гептана в присутствии Pt-содержащих вольфраматциркониевых катализаторов // Катализ в промышленности. – 2022. – Т.22, №6. – С.30-39.
16. Омаров Ш.О., Пахомов Н.А. Варьирование условий осаждения и старения $ZrO_2 \cdot nH_2O$ как способ регулирования фазового состава и текстуры ZrO_2 // Катализ в промышленности. – 2020. – Т.20, №5. – С.335-343.
17. Сейтенова Г.Ж., Дюсова Р.М., Бурумбаева Г.Р. Математическое моделирование процессов нефтепереработки как метод ресурсосбережения и энергоэффективности // Нефть и газ. – 2023. – №1(133). – С.144-154.
18. Уржунцев Г.А., Ечевский Г.В. Высокоактивный катализатор изомеризации легких бензиновых фракций на основе сульфатированного оксида циркония // Катализ в промышленности. – 2018. – Т.18, №1. – С.60-66.
19. Смоликов М.Д., Бикметова Л.И., Казанцев К.В., Затолокина Е.В., Белый А.С. Изомеризация *n*-гексана на $Pt/SO_4/ZrO_2$ катализаторах, нанесенных на Al_2O_3 . Влияние добавок олова // Катализ в промышленности. – 2018. – Т.18, №2. – С.45-49.
20. Смоликов М.Д., Бикметова Л.И., Казанцев К.В., Шкуренко В.А., Яблокова С.С., Лавренов А.В. Нанесенные сульфатциркониевые катализаторы изомеризации гексана на носителях SiO_2 и Al_2O_3 . Влияние природы носителя // Катализ в промышленности. – 2023. – Т.23, №1. – С.67-74.
21. Смоликов М.Д., Джикия О.В., Бикметова Л.И., Казанцев К.В., Муромцев И.В., Белый А.С. Применение фторированного оксида алюминия в качестве носителя цирконосульфатного катализатора изомеризации гексана // Катализ в промышленности. – 2021. – Т.21, №3. – С.170-176.
22. Смоликов М.Д., Бикметова Л.И., Казанцев К.В., Муромцев И.В., Белый А.С. Промотирование нанесенных цирконосульфатных катализаторов сульфатами железа и марганца // Катализ в промышленности. – 2021. – Т.21, №3. – С.163-169.
23. Bahrani M., Mahmoudi S., Hamoule T., Aghajani M. Гидроконверсия *n*-гептана на бифункциональных катализаторах Pt-Ti-MSU/Al-Ti-MSU в микрореакторе // Нефтехимия. – 2021. – Т.61, №3. – С.347-358.
24. Мамедов С. Э., Ахмедова Н. Ф., Мирзалиева С. Э., Мамедова А. З., Ахмедов Э. И., Ширинова С. М. Каталитические свойства биметаллических Zr-Zn-содержащих ультрасилос в превращении прямогонной бензиновой фракции // Баш. хим. ж. – 2019. – Т.26, №1. – С.54-58.
25. Tamizhdurai P., Ramesh A., Santhan Krishnan P., Narayanan S., Shanthi K., Sivasanker S. Effect of acidity and porosity changes of dealuminated mordenite on *n*-pentane, *n*-hexane and light naphtha isomerization // Microporous and Mesoporous Materials. – 2019. – V.287. – Pp.192-202.
11. Demikhova N.R., Boev S.S., Reshetina M.V., Cherednichenko K.A., Vinokurov V.A., Glotov A.P. *Mikro-mezoporistyj katalizator na osnove dealuminirovannykh nanotrubok gallyuazita dlya izomerizatsii aromaticheskoi fraktsii C-8* [Microporous catalyst based on dealuminated halloysite nanotubes for isomerization of aromatic C-8 fraction] *Nanogeterogennyi kataliz* [Nanoheterogeneous Catalysis], 2021, vol.6, no.2, pp.63-74.
12. Bensafi B., Chouat N., Djafri F. [The universal zeolite ZSM-5: Structure and synthesis strategies. A review]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2023, vol.496, pp.2153-2197.
13. Shen Y., Qiao L., Zhang Zh., Gao Sh., Han Y., Liu J., Liu J. [Synthesis, structure, and acidity regulation of ZSM-12 zeolite in alkane isomerization]. *Fuel*, 2025, vol.380, p.133221.
14. Pakhomov N.A. *Nauchnye osnovy prigotovleniya katalizatorov: vvedenie v teoriyu i praktiku* [Scientific fundamentals of catalyst preparation: introduction to theory and practice]. Novosibirsk, RAS Publ., 2011, 261 p.
15. Smolikov M.D., Shkurenok V.A., Bikmetova L.I., Leont'eva N.N., Lavrenov A.V. *Sovmestnaya izomerizatsiya geksana i heptana v prisutstvii Pt-soderzhashchikh vol'framatsirkonievyykh katalizatorov* [Joint isomerization of hexane and heptane in the presence of Pt-containing tungsten-zirconium catalysts]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2022, vol.22, no.6, pp.30-39.
16. Omarov Sh.O., Pakhomov N.A. *Var'irovanie uslovii osazhdeniya i stareniya $ZrO_2 \cdot nH_2O$ kak sposob regulirovaniya fazovogo sostava i tekstury ZrO_2* [Variation of precipitation and aging conditions of $ZrO_2 \cdot nH_2O$ as a method for regulating the phase composition and texture of ZrO_2]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2020, vol.20, no.5, pp.335-343.
17. Seytenova G.Zh., Dyusova R.M., Burumbaeva G.R. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov regulirovaniya fazovogo sostava i tekstury ZrO_2* [Mathematical modeling of oil refining processes as a method of resource saving and energy efficiency]. *Neft i gas* [Oil and Gas], 2023, no.1 (133), pp.144-154.
18. Urzhuntsev G.A., Echevskiy G.V. *Vysokoaktivnyi katalizator izomerizatsii legkikh benzinoikh fraktsiy na osnove sulfatirovannogo oksida tsirkoniya* [Highly active isomerization catalyst for light gasoline fractions based on sulfated zirconia oxide]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2018, vol.18, no.1, pp.60-66.
19. Smolikov M.D., Bikmetova L.I., Kazantsev K.V., Zatolokina E.V., Belyi A.S. *Izomerizatsiya n-geksana na $Pt/SO_4/ZrO_2$ katalizatorakh, nanesennykh na Al_2O_3 . Vliyanie dobavok olova* [Isomerization of *n*-hexane on $Pt/SO_4/ZrO_2$ catalysts supported on Al_2O_3 . Influence of tin additives]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2018, vol.18, no.2, pp.45-49.
20. Smolikov M.D., Bikmetova L.I., Kazantsev K.V., Shkurenok V.A., Iablokova S.S., Lavrenov A.V. *Nanesennyye sulfatsirkonievyye katalizatory izomerizatsii geksana na nositelyakh SiO_2 i Al_2O_3 . Vliyanie prirody nositelya* [Supported sulfate-zirconium catalysts for hexane isomerization on SiO_2 and Al_2O_3 supports. Influence of the nature of the support]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2023, vol.23, no.1, pp.67-74.

26. Джумабаева Л. С., Закарина Н. А., Третьяков В. Ф., Елигабаева Г. Ж., Жумадуллаев Д. А., Егорова Т. Б. Изомеризация *n*-гексана на нанодисперсных катализаторах, нанесенных на кислотно-активированный монтмориллонит в Na-форме // Нефтехимия. – 2019. – Т.59, №2. – С.152-158.
27. Казанцев Е.О. Аналитический обзор катализаторов изомеризации легкой бензиновой фракции // Вестник магистратуры. – 2019. – №1-2(88). – С.17-22.
28. Бурдакова Е.С., Петров В.В. Каталитическая система на основе ионной жидкости для получения высокооктановых компонентов бензиновых топлив в реакции изомеризации легких *n*-парафинов // ЖПХ. – 2020. – Т.93, №6. – С.899-905.
29. Бурдакова Е.С., Кабанец Н.А., Егорычева Ю.А. Влияние примесей сырья на процесс изомеризации легких углеводородов в присутствии катализатора на основе ионной жидкости с целью получения высокооктановых компонентов бензиновых топлив // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2021. – №4. – С.3-9.
30. Makova A.S., Timofeeva M.N., Tkachenko O.P., Panchenko V.N. et.al. Effect of microwave irradiation on the synthesis of zeolite with ferrierite structure: study of acid and catalytic properties // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2024. – V.703. – P.135321.
31. Kumar A., Singhal Sh., Badoni R., Aggarwal Sh. Synthesis of catalyst using microwave technique for alkane isomerization // Materials Today: Proceedings. – 2019. – V.17. – Pp.138-146.
32. Chauhan N.P.S., Perumal P., Chundawat N.S., Jadoun S. Achiral and chiral metal-organic frameworks (MOFs) as an efficient catalyst for organic synthesis // Coordination Chemistry Reviews. – 2025. – V. 533.
33. Makhlof B., Abdelsadek Z., Hamada B., Masset P.J. Improvement of the octane number of petroleum naphtha using a molten salt based thermo-catalytic process // South African Journal of Chemical Engineering. – 2025. – V.52. – Pp.170-182.
34. Лихачева Н. А., Митрофанова В. В., Шарипова Г. В., Аминова Э. К. Основные направления развития процесса изомеризации // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2021. – №1. – С.60-79.
35. Петропавловский М.Ю., Травкина О.С. Катализаторы, используемые в изомеризации парафиновых углеводородов // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2023. – №2. – С.95-102.
36. Затылкин Н.С., Буланкин В.А., Ухов А.Н., Фомина В.В. Исследование и выбор катализаторов для установки пентан-гексановой изомеризации // Нефтегазовое дело. – 2024. – №3. – С.236-246.
37. Электронный ресурс <https://nefthim.ru> (дата обращения: 03.09.2025).
38. Горелов Д. А., Сариллов М. Ю. Реконструкция установки каталитической изомеризации с целью вовлечения в процесс гептан-октановой фракции // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – Т.1, №2(38). – С.50-60.
39. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 30-2021. Переработка нефти. – М., 2021. – 700 с.
40. Королева А.Н., Бахман В.А., Царегородцев Е.Л. Моделирование процесса изомеризации легких бензиновых фракций в программном пакете
21. Smolikov M.D., Dzhikiya O.V., Bikmetova L.I., Kazantsev K.V., Muromtsev I.V., Belyi A.S. *Primenenie fluorirovannogo oksida alyuminiya v kachestve nositelya tsirkonosul'fatnogo katalizatora izomerizatsii geksana* [Use of fluorinated aluminum oxide as a carrier for zirconium sulfate catalyst of hexane isomerization]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2021, vol.21, no.3, pp.170-176.
22. Smolikov M.D., Bikmetova L.I., Kazantsev K.V., Muromtsev I.V., Belyi A.S. *Promotirovanie nanesennykh tsirkonosul'fatnykh katalizatorov sul'fatami zheleza i margantsa* [Promotion of supported zirconium sulfate catalysts with iron and manganese sulfates]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2021, vol.21, no.3, pp.163-169.
23. Bahrami M., Mahmoudi S., Hamoule T., Aghajani M. *Gidrokonversiya n-heptana na bifunktsional'nykh katalizatorakh Pt-Ti-MSU/Al-Ti-MSU v mikroreaktore* [Hydroconversion of *n*-heptane on bifunctional Pt-Ti-MSU/Al-Ti-MSU catalysts in a microreactor]. *Neftekhimiya* [Petroleum Chemistry], 2021, vol.61, no.3, pp.347-358.
24. Mamedov S.E., Akhmedova N.F., Mirzalieva S.E., Mamedova A.Z., Akhmedov E.I., Shirinova S.M. *Kataliticheskie svoystva bimetallicheskiykh Zr-Zn-soderzhashchikh ul'trasilov v prevrashchenii priamogoinoi benzinoi fraktsii* [Catalytic properties of bimetallic Zr-Zn-containing ultrasils in the conversion of straight-run gasoline fraction]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2019, vol.26, no.1, pp.54-58.
25. Tamizhdurai P., Ramesh A., Santhan Krishnan P., Narayanan S., Shanthi K., Sivasanker S. [Effect of acidity and porosity changes of dealuminated mordenite on *n*-pentane, *n*-hexane and light naphtha isomerization]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, vol.287, pp.192-202.
26. Dzhumabaeva L.S., Zakarina N.A., Zhumadullaev D.A., Yeligbayeva G.Z., Tret'yakov V.F., Egorova T.B. [*n*-Hexane isomerization in the presence of nanodispersed catalysts supported on acid-activated montmorillonite in the sodium form]. *Petroleum Chemistry*, 2019, vol.59, no.2, pp.160-166.
27. Kazantsev E.O. *Analiticheskiy obzor katalizatorov izomerizatsii legkoy benzinoy fraktsii* [Analytical review of catalysts for light gasoline fraction isomerization]. *Vestnik magistratury* [Bulletin of the Master's Degree], 2019, no.1-2(88), pp.17-22.
28. Burdakova E.S., Petrov V.V. [A catalytic system based on an ionic liquid for preparing high-octane components of gasoline fuels by isomerization of light *n*-paraffins]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2020, vol.93, no.6, pp.920-926.
29. Burdakova E.S., Kabanets N.A., Egorycheva Yu.A. *Vliyaniye primesei syr'ya na protsess izomerizatsii legkikh uglevodorodov v prisutstvi katalizatora na osnove ionnoy zhidkosti s tsel'yu polucheniya vysokooktanovykh komponentov benzinoikh topliv* [Influence of feedstock impurities on the isomerization process of light hydrocarbons in the presence of a catalyst based on ionic liquid for obtaining high-octane components of gasoline fuels]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tehnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt* [Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Advanced Experience], 2021, no.4, pp.3-9.
30. Makova A.S., Timofeeva M.N., Tkachenko O.P. et.al. [Effect of microwave irradiation on the synthesis of zeolite with ferrierite structure: study of acid and catalytic properties]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, vol.703, p.135321.

- ASPEN HYSYS и анализ полученных результатов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – №7(133). – С.1-5.
41. Коронатов Н.Н., Кокшаров А.Г., Иванчина Э.Д., Калистратов А.А., Крылов Д.В. Повышение эффективности процессов каталитического риформинга бензинов, изомеризации и дегидрирования на установках ООО «КИНЕФ» с применением интеллектуальных математических моделей // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2022. – №3. – С.34-40.
 42. Чузлов В.А., Копычева У.Н. Моделирование процесса изомеризации гептановой фракции // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – №10(130). – С. 72-76.
 31. Kumar A., Singhal Sh., Badoni R., Aggarwal Sh. [Synthesis of catalyst using microwave technique for alkane isomerization]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol.17, pp.138-146.
 32. Chauhan N.P.S., Perumal P., Chundawat N.S., Jadoun S. [Achiral and chiral metal-organic frameworks (MOFs) as an efficient catalyst for organic synthesis]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, vol.533, p.216536.
 33. Makhlouf B., Abdelsadek Z., Hamada B., Masset P.J. Improvement of the octane number of petroleum naphtha using a molten salt based thermo-catalytic process. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2025, vol.52, pp.170-182.
 34. Likhacheva N.A., Mitrofanova V.V., Sharipova G.V., Aminova E.K. *Osnovnye napravleniya razvitiya protsessa izomerizatsii* [Main directions of development of the isomerization process]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal Neftegazovoe delo* [Electronic Scientific Journal Oil and Gas Business], 2021, no.1, pp.60-79.
 35. Petropavlovskiy M.Yu., Travkina O.S. *Katalizatory, ispol'zuemye v izomerizatsii parafinovykh uglevodorodov* [Catalysts used in the isomerization of paraffin hydrocarbons]. *Vestnik molodogo uchenogo UGNTU* [Bulletin of the Young Scientist of USPTU], 2023, no.2, pp.95-102.
 36. Zatytkin N.S., Bulankin V.A., Ukhov A.N., Fomina V.V. *Issledovanie i vybor katalizatorov dlya ustanovki pentan-geksanovoy izomerizatsii* [Research and selection of catalysts for a pentane-hexane isomerization unit]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2024, no.3, pp.236-246.
 37. <https://neftim.ru> (accessed 03.09.2025).
 38. Gorelov D.A., Sarilov M.Yu. *Rekonstruktsiya ustanovki kataliticheskoy izomerizatsii s tsel'yu vovlecheniya v protsess heptan-oktanovoy fraktsii* [Reconstruction of the catalytic isomerization unit for the purpose of involving the heptane-octane fraction in the process]. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University], 2019, vol.1, no.2(38), pp.50-60.
 39. *Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam ITS 30-2021. Pererabotka nefti* [Information and Technical Guide on Best Available Techniques ITS 30-2021. Oil refining]. Moscow, 2021, 700 p.
 40. Koroleva A.N., Bakhman V.A., Tsaregorodtsev E.L. *Modelirovanie protsessa izomerizatsii legkikh benzinokh fraktsii v programnom pakete ASPEN HYSYS i analiz poluchennykh rezul'tatov* [Modeling of the light gasoline fractions isomerization process in the ASPEN HYSYS software package and analysis of the obtained results]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Research Journal], 2023, no.7(133), pp.1-5.
 41. Koronatov N.N., Koksharov A.G., Ivanchina E.D., Kalistratov A.A., Krylov D.V. *Povyshenie effektivnosti protsessov kataliticheskogo reforminga benzino, izomerizatsii i degidrirovaniya na ustanovkakh ООО «КИНЕФ» s primeneniem intellektual'nykh matematicheskikh modeley* [Improving the efficiency of catalytic reforming of gasolines, isomerization and dehydrogenation processes at KINEF LLC facilities using intelligent mathematical models]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt* [Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Advanced Experience], 2022, no.3, pp.34-40.
 42. Chuzlov V.A., Kopicheva U.N. *Modelirovanie protsessa izomerizatsii heptanovoy fraktsii* [Modeling of the heptane fraction isomerization process]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU* [Business Journal Neftegaz.RU], 2022, no.10(130), pp.72-76.