

Научная статья
УДК 66.095.253
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-3-27-34>
EDN MSPUZV

Современные направления в разработке катализаторов алкилирования

Татьяна Владимировна Сальникова

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, t_salnikowa@mail.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены существующие катализаторы процесса алкилирования и современные направления улучшения их свойств. Целью процесса алкилирования является превращение малоценных продуктов термокаталитических процессов в ценные компоненты, увеличивающие октановое число бензинов. Алкилат соответствует строгим экологическим требованиям, при этом не содержит бензол, характеризуется низким давлением насыщенных паров и практически не содержит в своем составе серы. Классические кислотные катализаторы процесса имеют ряд недостатков, связанных с экологическими рисками и сложностями эксплуатации. Поэтому в современном производстве идет поиск альтернативных методов, менее вредных для окружающей среды и безопасных для персонала. Кроме того, разработка новых модифицированных каталитических систем позволит повысить эффективность процессов алкилирования ароматических соединений. Перспективным направлением развития процесса является переход на твердокислотные катализаторы, которые исключают токсичные и агрессивные летучие компоненты, имеют низкий уровень отходов производства, обладают высокой активностью, селективностью, стабильностью. Увеличение селективности, стабильности, скорости реакции и выхода целевых продуктов достигается за счет изменения структуры пор, кислотно-активных свойств поверхности, использования гибридных материалов и промотеров. Кроме того, нанесенные металлические катализаторы позволяют осуществлять процесс алкилирования при умеренных температурах в сочетании с простотой отделения от реакционной массы. Применение физических методов активации катализаторов в совокупности с химической обработкой дает значительные положительные результаты. Основными недостатками применения твердых катализаторов являются невысокая продолжительность их работы и трудность регенерации при быстрой обработке. Эти параметры во многом определяют экономическую обоснованность процесса, что сдерживает активное внедрение подобных катализаторов в промышленность.

Ключевые слова: алкилирование, гетерогенные катализаторы, цеолитсодержащий катализатор, активация катализатора, модифицирование катализатора

Для цитирования: Сальникова Т. В. Современные направления в разработке катализаторов алкилирования // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 3. С. 27–34. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-3-27-34>. EDN MSPUZV.

Original article

Modern trends in the development of alkylation catalysts

Tatyana V. Salnikova

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, t_salnikowa@mail.ru*

Abstract. The article considers existing catalysts of the alkylation process and modern directions of improving their properties. The purpose of the alkylation process is to convert low-value products of thermocatalytic processes into valuable components that increase the octane number of gasoline. Alkylate meets strict environmental requirements, does not contain benzene, is characterized by low saturated vapor pressure and contains virtually no sulfur. Classic acid catalysts of the process have a number of disadvantages associated with environmental risks and operational difficulties. Therefore, in modern production, alternative methods are sought that are less harmful to the environment and safe for personnel. In addition, the development of new modified catalytic systems will improve the efficiency of alkylation processes of aromatic compounds. A promising direction for the development of the process is the transition to solid acid catalysts that exclude toxic and aggressive volatile components, have a low level of production waste,

and are highly active, selectivity, and stability. An increase in selectivity, stability, reaction rate, and yield of target products is achieved by changing the pore structure, acid-active properties of the surface, and the use of hybrid materials and promoters. In addition, the applied metal catalysts allow the alkylation process to be carried out at moderate temperatures in combination with the ease of separation from the reaction mass. The use of physical methods of catalyst activation in combination with chemical treatment yields significant positive results. The main disadvantages of using solid catalysts are their short service life and the difficulty of regeneration during rapid treatment. These parameters largely determine the economic feasibility of the process, which hinders the active introduction of such catalysts into industry.

Keywords: alkylation, heterogeneous catalysts, zeolite-containing catalyst, catalyst activation, catalyst modification

For citation: Salnikova T. V. Modern trends in the development of alkylation catalysts. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;3:27-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-3-27-34>. EDN MSPUZV.

Введение

Алкилирование занимает важное место в технологическом комплексе российской нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей. В результате этого процесса образуется алкилат – важный компонент, входящий в состав товарного бензина. Среди преимуществ алкилата выделяются его высокие октановые числа (до 96 по исследовательскому методу и до 92 по моторному), отсутствие серосодержащих примесей, бензола и низкое давление насыщенных паров [1]. Именно эти характеристики делают алкилат более предпочтительным по сравнению с другими видами бензинов, однако его доля на рынке остается очень небольшой. Так, в России этот показатель не превышает 1 %, а в мировом масштабе – около 8 % [2].

Углубленное исследование процесса алкилирования является одним из наиболее приоритетных в современной нефтеперерабатывающей промышленности. При этом повышение эффективности процесса во многом может быть достигнуто переходом на твердые суперкислотные катализаторы (solid acid catalyst – SAC) взамен жидких кислот.

Катализаторы процесса алкилирования

Самым первым катализатором, используемым в процессе алкилирования, являлся хлорид алюминия $AlCl_3$. Однако развитие направления потребовало другие, более эффективные катализаторы.

Классическими катализаторами алкилирования считаются *серная* или *фтористоводородная (плавиковая) кислота*. При их использовании реакции протекают в избытке изобутана, что позволяет подавлять нежелательные побочные реакции, например образование полимеров [3].

Серная кислота делает возможным проводить процесс при относительно низких температурах – до 10 °С, а с плавиковой кислотой реакции протекают при комнатной температуре. Преимущество использования серной кислоты в том, что ее расход достаточно невелик, а получаемые продукты имеют более высокие октановые числа. Именно поэтому с учетом данных фактов и соображений безопасности на большинстве нефтеперерабатываю-

щих заводах используют именно серную кислоту, а не плавиковую [4].

Реакции алкилирования с кислотами протекают в диффузионной области с лимитирующей стадией массопереноса реагентов к поверхности раздела фаз. Для ускорения этих реакций в среде серной и плавиковой кислот необходимо интенсифицировать процессы перемешивания и диспергирования реакционной массы для увеличения поверхности раздела кислотной и углеводородной фаз.

Однако использование кислот в алкилировании оказывает негативное влияние на экологию, поэтому по ходу процесса образуются различные загрязненные тяжелые побочные продукты, которые подвергаются сжиганию [5]. К тому же агрессивность кислот повышает возможность возникновения различных опасностей при эксплуатации установок, из-за чего они требуют тщательного технического обслуживания и ремонта.

Совершенствование процесса алкилирования

В связи с вышесказанным появилась необходимость в разработке и внедрении в производство более безопасной и надежной технологии алкилирования. Так, в процессе возникло новое направление – алкилирование на *твердых кислотных (цеолитсодержащих) катализаторах* (SAC – solid acid catalyst). Процесс алкилирования с использованием твердых катализаторов исключает образование токсичных и летучих компонентов, уменьшает риски во время эксплуатации и позволяет уменьшить количество отходов и побочных продуктов [6]. Поэтому сейчас интенсивно идет разработка новых катализаторов и их усовершенствование.

Одним из самых крупнотоннажных производств является получение этилбензола алкилированием бензола этиленом. Авторами [7, 8] разработаны новые высокоактивные гетерогенные катализаторы алкилирования ароматических соединений олефинами на основе пентахлорида ниобия. Реакция протекает с высокой скоростью при комнатной температуре. Так, конверсия гексена-1 при алкилировании бензола или толуола близка к 100 % уже через 5 мин после начала реакции.

Авторами [9] представлены результаты исследования реакции алкилирования 2-метилфенола метанолом, этанолом и 1-пропанолом в присутствии катализатора Pd-НЦВМ. Была установлена активность алкилирующих агентов в реакции взаимодействия 2-метилфенола нормальными спиртами (C_1 – C_3) и селективность каталитического образования алкилфенолов в исследованном процессе. Показано, что в процессе каталитического алкилирования с повышением молярного веса спирта растут его конверсия, степень превращения 2-метилфенола и селективность образования о-алкилпроизводных крезолов.

В работе [10] исследованы реакции алкилирования 2-метилфенола 1- и 2-пропанолами в присутствии Pd-НЦВМ. Показано, что палладийсодержащий высококремнеземный цеолит проявляет высокие о-алкилирующие способности в случае 1-пропанола, в то время как в случае 2-пропанола имеет место о- и п-алкилирование о-крезола. Найдены условия реакции для селективного (85,0 %) получения 2-пропил-6-метилфенола и смеси 2-изопропил-6-метил и 2-метил-4-изопропилфенолов (молярные соотношения 1 : 0,1) с селективностью 94,0 % при взаимодействии 2-метилфенола соответствующими пропанолами.

Процессы алкилирования с применением цеолитсодержащих катализаторов

В настоящее время значительное число исследований в области технологии алкилирования бензола этиленом в этилбензол (ЭБ) связана с получением и применением цеолитсодержащих катализаторов, представляющих собой твердые пористые системы, содержащие активный компонент и связующее вещество [11]. Так, авторами [12] был синтезирован базовый катализатор H γ -БС, представляющий собой цеолит Y, без связующих веществ в кислотной H $^+$ -форме. Данный катализатор подвергли модификации растворами соляной и лимонной кислот. Экспериментально было установлено, что при использовании в качестве алкилирующего агента как гидрированной, так и негидрированной этан-этиленовой фракции пиролиза вместо этилена полимеризационной чистоты в реакции жидкофазного алкилирования бензола на катализаторе, модифицированном 0,3 н соляной кислотой, концентрация этилбензола в алкilate и селективность образования этилбензола выше. Это свидетельствует о том, что применение таких модифицированных цеолитных катализаторов и использование различных фракций пиролизного газа может значительно повысить эффективность процесса алкилирования.

В работе [13] изучено влияние типа (NaOH, TMAOH, TPAOH) и концентрации (3–12 ммоль/г) основания на формирование мезопор при рекристаллизации цеолита MWW. Показано, что при ис-

пользовании гидроксида натрия образуются преимущественно цилиндрические мезопоры, а при использовании гидроксидов тетраалкиламмония – щелевидные. При изучении влияния рекристаллизации на каталитическую активность в реакции алкилирования бензола пропиленом выявлено, что щелевидные мезопоры приводят к увеличению активности, а цилиндрические не оказывают существенного влияния на каталитические свойства.

Также исследуются физико-химические свойства новых гибридных катализаторов на основе нанесенного сульфатированного оксида циркония на цеолит структурного типа Beta [14]. Кислотно-основные характеристики подобных катализаторов определяются количеством нанесенного компонента, максимальная концентрация кислотных центров Бренстеда достигается при нанесении 1,7 масс. % сульфатированного оксида циркония. Экспериментально подтверждено, что гибридные катализаторы на основе цеолита H-Beta с нанесенным сульфатированным диоксидом циркония (образец с 4 масс. % сульфатированного оксида циркония) являются более стабильными и демонстрируют более высокую селективность с течением времени по углеводородам C_8 и триметилпентанам по сравнению с массивным сульфатированным диоксидом циркония. Данные исследования представляют перспективное направление для развития промышленного процесса алкилирования.

В исследовании [15] синтезированы высокоэффективные катализаторы для жидкофазного алкилирования бензола этиленом на основе цеолита Y без связующих веществ. Модифицирование осуществляли обработкой водными растворами соляной и лимонной кислот для удаления из его состава внеклеточного алюминия, образующегося при частичном деалюминировании цеолита Y. Синтезированные катализаторы были испытаны в алкилировании бензола этиленом при температуре 200 °C, давлении 2,5 МПа, молярном соотношении бензол : этилен, равном 5 : 1, объемной скорости подачи бензола 5 ч $^{-1}$. При использовании модифицированного катализатора содержание ЭБ в алкilate увеличивается на 27 %, а селективность по ЭБ – на 5 %, по сравнению с исходным цеолитом Y.

Авторами [16] предложен новый способ получения активных низкотемпературных гетерогенных катализаторов алкилирования и трансалкилирования ароматических соединений на основе хлорида алюминия, закрепленного на поверхности силикагеля. Такой катализатор обеспечивает высокую скорость реакции при комнатной температуре. Например, конверсия гексена-1 при алкилировании бензола или толуола достигает почти 100 % уже через 5 мин после начала реакции. Реакция трансалкилирования протекает на тех же катализаторах, но при более высоких температурах и с меньшей скоро-

стью. Так, при температуре 80 °С конверсия дигексилбензола через 1 ч составляет около 75 %. При алкилировании бензола этиленом (комнатная температура, давление этилена – 5 атм) через 45 мин после начала реакции образуется 39,2 % этилбензола и лишь 3,6 % диэтилбензолов (три изомера положения).

На эффективность процесса алкилирования может оказывать влияние размер кристаллов цеолита. В работе [17] исследовано влияние размера кристаллов FAU(Y) (350, 450, и 850 нм) на физико-химические и каталитические свойства CsNaY в реакции алкилирования анилина метанолом. Установлено, что уменьшение размера кристаллов цеолита приводит к усилению основных свойств CsNaY и увеличению селективности по N-алкилированным продуктам. Показано, что в алкилировании анилина метанолом наиболее активным и селективным оказался CsNaY с размером кристаллов 450 нм, со степенью обмена катионов натрия на катионы цезия 64 %, модифицированный CsOH. Конверсия анилина на этом образце составила 95 %, селективность по продуктам N-алкилирования – 99,8 мол. %.

Изучено влияние концентрации лантана на физико-химические и каталитические свойства цеолита HZSM-5 в реакции алкилирования толуола изопропанолом в интервале температур 250–350 °С. Было показано в [18], что при увеличении концентрации лантана в HZSM-5 с 1,0 до 7,0 масс. % кристаллическая структура цеолита сохраняется, однако удельная площадь поверхности и объем пор уменьшаются. При этом происходит перераспределение кислотных центров – уменьшение концентрации сильных кислотных центров Бренстеда (В) и увеличение концентрации кислотных центров Льюиса (L) средней силы (снижение соотношения В/L-кислотных центров – с 3,53 до 0,20). Все это оказывает решающее влияние на селективность продуктов реакции и селективность по п-изопропилтолуолу (4-ИПТ): максимальная селективность (72,4 %) достигается на цеолите, содержащем 5,0 масс. % лантана при отношении центров В/L, равном 0,25.

Авторами [19] проведено исследование влияния различного количества связующего вещества – гидроокиси алюминия – на текстурные, кислотные и каталитические свойства катализаторов алкилирования бензола пропиленом, основанных на нанокристаллическом цеолите BEA. Результаты показали, что увеличение содержания связующего в образце ведет к росту объема мезопор и одновременному снижению объема микро- и макропор. Также отмечается, что при увеличении количества связующего уменьшается концентрация слабых кислотных центров, тогда как концентрация сильных кислотных центров остается практически неизменной. Эти закономерности связаны с взаимодействием связующего вещества с цеолитом в процессе приготовления катализатора и образованием новых кислот-

ных центров. Кроме того, повышение содержания связующего способствует увеличению механической прочности гранул, однако при этом наблюдается снижение каталитической активности и стабильности катализатора в газофазном алкилировании бензола пропиленом.

Исследователями [20] разработан катализатор на основе мезопористого органического носителя фенолформальдегидный полимер (MPF), модифицированный ионной жидкостью IMHSO₄. Свойства полученного катализатора изучали на примере алкилирования ароматических соединений октен-1. Полученные результаты показали, что при использовании такого катализатора в алкилировании фенолов образуются как алкилфенолы (С-алкилаты), так и алкилфениловые (О-алкилаты) эфиры с общим выходом до 60 %. В случае алкилирования бензола и его производных значимые конверсии (45–50 %) достигаются только для толуола и анизол.

Ввиду успешного применения Mo/W-содержащих катализаторов в процессах изомеризации, крекинга, гидроочистки и т. д. актуальным вопросом является исследование и применение подобных систем в процессе алкилирования изобутана. Высокую активность в данном процессе показывают катализаторы, содержащие ZrO₂ в метастабильной тетраэдрической модификации (Т). Однако их использование сопряжено с быстрой дезактивацией активных льюисовских кислотных центров (ЛКЦ) и переходом Т-модификации в неактивную моноклинную структуру (М) при конечной термообработке катализатора. Автор [21], опираясь на работу [22], выявил, что добавление вольфрамов и Мо-содержащих компонентов значительно замедляет процесс дезактивации активных центров. Кроме того, добавки Mo/W позволяют получить активные катализаторы с необходимыми кислотно-основными характеристиками поверхности для эффективно алкилирования изобутана олефинами.

Еще одним перспективным направлением в разработке катализаторов алкилирования является промотирование цеолитов никелем и платиной. Исследователи [23, 24] доказали, что промотирование цеолитов никелем и платиной повышает октановое число и содержание изооктанов в алкилате по сравнению с непрототированными образцами. Особенно эффективными оказались образцы, промотированные раствором Ni(NO₃)₂ с содержанием катионов Ni²⁺ 1 масс. % как ионным обменом, так и пропиткой. Эти образцы демонстрируют хорошую стабильность при многократных циклах реакция-регенерация. В результате получается алкилат с высоким содержанием фракции C₈ (более 30 масс. %), что обеспечивает октановое число выше 92 пунктов. Промотирование цеолитов никелем методом пропитки является менее трудоемким и более рентабельным для промышленного применения по сравнению с ионным обменом. Такой подход позволяет получать высокоэффективные катализаторы для ал-

килирования изобутана олефинами с высокой стабильностью и экономической привлекательностью.

Авторами [25] проведено исследование влияния температуры окислительной регенерации катализатора на основе отечественного цеолита типа X в катионообменной форме на его каталитические свойства в реакции алкилирования изобутана бутиленами. Экспериментальные данные показали, что при температуре регенерации 500 °C катализатор восстанавливает свою первоначальную активность, характерную для свежего образца. После семи циклов окислительной регенерации наблюдается практически полное восстановление каталитической активности без нарушения структуры цеолита, что свидетельствует о высокой стабильности и долговечности материала.

В работе [26] изучено влияние морфологии цеолитных катализаторов, синтезированных на основе отечественных цеолитов типа NaX в катионообменной форме, на основные показатели реакции алкилирования изобутана бутиленами. Исследования показали, что условия синтеза катализаторов не оказывают существенного влияния на структуру их поверхности. Оптимальные параметры реакции достигаются при использовании частиц катализатора в диапазонах размеров до 0,8 мкм и/или выше 3,5 мкм. В этих условиях обеспечиваются высокие показатели: конверсия бутиленов достигает 98–100 масс. %, выход алкилата приближается к теоретическому значению (99–100 масс. %), а содержание C₈-продуктов (преимущественно изооктанов) не превышает 1,5 масс. %.

Эти результаты свидетельствуют о возможности получения высокоэффективных и стабильных катализаторов для алкилирования изобутана бутиленами с оптимизированной морфологией и условиями регенерации, что важно для промышленного применения в нефтехимической промышленности.

Физические методы активации катализаторов

В работе [27] изучено влияние ультразвукового воздействия на эффективность ионного обмена цеолита NaX (мольное соотношение Si/Al = 1,34), гранулированного без связующих. Обработка осуществлялась методами последовательных обменов растворами нитратов кальция, лантана и аммония при температуре 80 °C с промежуточными прокалками после каждой стадии. В сравнении с аналогичным процессом без ультразвука было установлено, что ультразвуковая обработка (с силой тока 2,6 А) значительно повышает глубину замещения натрия в решетке цеолита, достигая менее 0,3 масс. % остаточного оксида натрия. Анализ физико-химических и каталитических свойств показал, что использо-

вание ультразвука обеспечивает практически полное замещение натрия многозарядными катионами, что способствует повышению активности и стабильности полученных катализаторов.

Исследователями [28] проведено сравнение методов алкилирования ацетоуксусного эфира бензилхлоридом под действием микроволнового излучения и традиционного межфазного катализа. В качестве катализатора использована четвертичная аммониевая соль – триэтилбензиламмонийхлорид. Результаты показали, что микроволновое излучение в системе «твердая фаза – жидкость» способствует селективному монобензилированию ацетоуксусного эфира, обеспечивая высокий выход целевого продукта и минимальный гидролиз исходного эфира. В то же время в системе «жидкость – жидкость» под действием микроволн происходит преимущественно гидролиз эфира без образования желаемого продукта. Таким образом, применение микроволнового излучения позволяет контролировать реакцию селективность и повышать эффективность процесса алкилирования.

Изучено влияние условий термодаровой обработки на свойства цеолитсодержащего катализатора алкилирования бензола этиленом [29]. Приготовленный катализатор подвергли термодаровой обработке в среде 100 % водяного пара при различных температурах в течение различных промежутков времени. Были изучены кислотные свойства полученных образцов. В тех же условиях были исследованы свойства импортного аналога – катализатора EBEMAX-1. Установлено, что по своим каталитическим свойствам синтезированный катализатор Кт-7 превосходит импортный аналог.

Заключение

Несмотря на свою долгую историю процесс алкилирования продолжает активно развиваться и модернизироваться. Данный процесс будет оставаться одним из основных в химической технологии в связи с нуждаемостью рынка в товарном бензине и ряде ароматических углеводородов. В настоящее время проводятся исследования по применению в процессе алкилирования твердых кислотных катализаторов. Оптимизация кислотных и структурных характеристик, разработка эффективных методов регенерации твердокислотных катализаторов алкилирования доказывают, что твердые системы по своим свойствам не уступают жидким кислотам. Существенной проблемой, замедляющей внедрение твердых катализаторов, является их быстрая дезактивация, решение которой даст толчок к активному использованию подобных катализаторов в промышленности.

Список источников

1. Князев А. С. и др. Модифицированные катализаторы окисления спиртов // *Фундамент. исслед.* 2005. № 1. С. 52.
2. Калиев А. Ж. Перспективные процессы алкилирования с целью получения высокооктановых компонентов

бензина // *Молод. ученый.* 2022. № 2 (397). С. 47–49.

3. Лебедев, Д. С. Аналитический обзор катализаторов алкилирования изобутана олефинами // *Вестн. магистратуры.* 2018. № 5-3 (80). С. 33–37.

4. Шириязданов Р. Р. Исследование закономерностей

получения и применения цеолитсодержащих катализаторов алкилирования изобутана олефинами: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2011. 145 с.

5. Жеребцов С. И., Мусин Ю. В., Моисеев А. И. Влияние алкилирования на состав и выход битумоидов торфа // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 125–130.

6. Трапезникова Е. Ф., Смольникова Т. В., Хафизова С. Р. и др. Перспектива применения цеолитсодержащих катализаторов в процессе алкилирования // Электрон. науч. журн. Нефтегаз. дело. 2018. № 4. С. 117–143. DOI 10.17122/ogbus-2018-4-117-143.

7. Травкина О. С., Аглиуллин М. Р., Кутепов Б. И. Современное состояние промышленного производства и применения цеолитсодержащих адсорбентов и катализаторов в России // Катализ в промышленности. 2021. Т. 21, № 5. С. 297–307.

8. Быков В. И., Беляев Б. А., Бутенко Т. А. Новые гетерогенные катализаторы алкилирования на основе пентахлорида ниобия // Кинетика и катализ. 2018. Т. 59, № 5. С. 667–668.

9. Агаев А. А., Мурадов М. М., Гаджиева Х. А., Гараева И. Э. Алкилирование 2-метилфенола нормальными спиртами C1-C3 над Pd-НЦВМ // Башкир. хим. журн. 2023. Т. 30, № 3. С. 12–14.

10. Гаджиева Х., Мурадов М., Назарова М., Агаев А. Каталитическое алкилирование 2-метилфенола пропанолом // Annali d'Italia. 2020. № 11-1. С. 9–11.

11. Кошкин С. А. Анализ и оптимизация промышленной технологии получения этилбензола на цеолитсодержащих катализаторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 17 с.

12. Павлов М. Л., Басимова Р. А., Шавалеев Д. А., Эрштейн А. С. Разработка катализатора и процесса жидкофазного алкилирования бензола этиленом и этан-этиленовой фракцией пиролиза углеводородов // Нефтехимия. 2019. Т. 59, № 4. С. 417–422.

13. Шкуропатов А. В., Попов А. Г., Иванова И. И. Алкилирование бензола пропиленом на иерархических цеолитах MWW, полученных методом рекристаллизации // Современ. молекуляр. сита. 2021. Т. 3, № 2. С. 100–107.

14. Юферова Е. А., Девятков С. Ю., Федоров С. П. и др. Гибридные катализаторы на основе сульфатированного диоксида циркония и цеолита H-Beta для алкилирования изобутана изобутиленом // Журн. приклад. химии. 2017. Т. 90, № 10. С. 1323–1331.

15. Омаров Ш. О., Павлов М. Л., Басимова Р. А. и др. Синтез модифицированного катализатора для процесса жидкофазного алкилирования бензола этиленом // Нефтехимия. 2020. Т. 60, № 5. С. 686–692.

16. Быков В. И., Беляев Б. А. Новый способ приготовления катализаторов алкилирования на основе гетерогенизированного $AlCl_3$ // Кинетика и катализ. 2021. Т. 62, № 2. С. 277–280.

17. Пономарева О. А., Родионова Л. И., Шапошник П. А. и др. Алкилирование анилина метанолом на цеолитах CsNaY с различным размером кристаллов // Современ. молекуляр. сита. 2022. Т. 4, № 2. С. 114–121.

18. Абдуллаева Н. М., Воскресенский Л. Г., Ахмедова Н. Ф., Мамедов С. Э. Алкилирование толуола изо-

пропанолом на цеолите типа ZSM-5, модифицированном лантаном // Нефтехимия. 2021. Т. 61, № 2. С. 217–225.

19. Бок, Т. О., Андриако Е. П., Иванова И. И. Влияние содержания связующего на свойства катализаторов алкилирования бензола пропиленом на основе нанокристаллического цеолита BEA // Современ. молекуляр. сита. 2021. Т. 3, № 2. С. 93–99.

20. Бороноев М. П., Ма Г., Таланова М. Ю., Караханов Э. А. Алкилирование ароматических соединений в присутствии катализаторов на основе мезопористых фенолформальдегидных полимеров // Нефтехимия. 2018. Т. 58, № 3. С. 307–313.

21. Омаров Ш. О. О применении Mo/W в катализаторах алкилирования изобутана олефинами // Традиции и инновации: материалы научной конференции, посвященной 187-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), Санкт-Петербург, 03–04 декабря 2015 года. СПб.: Санкт-Петербург. гос. технолог. ин-т (техн. ун-т), 2015. С. 73.

22. Кузнецов П. Н., Кузнецова Л. И., Казбанова А. В. Каталитическая изомеризация алканов на анионмодифицированных формах диоксида циркония // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 18, № 3. С. 299–311.

23. Дорошенко, А. А., Утемов А. В., Семикин К. В. Цеолитсодержащие катализаторы, модифицированные Ni, для алкилирования изобутана олефинами // Изв. Санкт-Петербург. гос. технолог. ин-та (техн. ун-та). 2018. № 46 (72). С. 28–33.

24. Шириязданов Р. Р. Научно-прикладные основы процесса алкилирования изобутана олефинами на цеолитсодержащих катализаторах: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2017. 412 с.

25. Темникова В. А., Герзелиев И. М., Басханова М. Н., Максимов А. Л. О кислотной регенерации цеолитного катализатора алкилирования изобутана бутиленами // XXI Менделеев. съезд по общ. и приклад. химии: тез. докл., Санкт-Петербург, 09–13 сент. 2019 г.: в 6 т. СПб, 2019. Т. 4. С. 117.

26. Герзелиев И. М., Темникова В. А., Басханова М. Н., Максимов А. Л. Влияние морфологии цеолитных катализаторов на основные показатели реакции алкилирования изобутана бутиленами // Нефтехимия. 2019. Т. 59, № 6. С. 659–665. DOI 10.1134/S0028242119060029.

27. Герзелиев И. М., Остроумова В. А., Басханова М. Н. Интенсификация ионного обмена цеолита типа FAU при синтезе активного и селективного катализатора алкилирования изобутана бутиленами // Нефтехимия. 2018. Т. 58, № 4. С. 469–473.

28. Торосян Г. О., Оганесян Н. Р. Алкилирование ацетоуксусного эфира в условиях межфазного катализа микроволновым излучением // Башкир. хим. журн. 2016. Т. 23, № 4. С. 24–26.

29. Шавалеев Д. А., Эрштейн А. С., Алехина И. Е. и др. Влияние условий термодиффузионной обработки на свойства цеолитсодержащего катализатора алкилирования бензола этиленом // Вестн. Башкир. ун-та. 2016. Т. 21, № 1. С. 86–90.

References

1. Knjazev A. S. i dr. Modificirovannye katalizatory oksleniya spirtov [Modified catalysts for alcohol oxidation]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2005, no. 1, p. 52.

2. Kaliev A. Zh. Perspektivnyye processy alkilirovaniya

s cel'ju poluchenija vysokooktanovyh komponentov benzina [Promising alkylation processes for the production of high-octane gasoline components]. *Molodoj uchenyj*, 2022, no. 2 (397), pp. 47–49.

3. Lebedev, D. S. Analiticheskij obzor katalizatorov alkilirovanija izobutana olefinami [Analytical review of isobutane alkylation catalysts with olefins]. *Vestnik magistratury*, 2018, no. 5-3 (80), pp. 33-37.
4. Shirijazdanov R. R. *Issledovanie zakonornostej poluchenija i primenenija ceolitsoderzhashhih katalizatorov alkilirovanija izobutana olefinami: dis. ... kand. tehn. nauk* [Investigation of the patterns of production and application of zeolite-containing catalysts for alkylation of isobutane with olefins: dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Ufa, UGNTU, 2011. 145 p.
5. Zharebcov S. I., Musin Ju. V., Moiseev A. I. V lijanie alkilirovanija na sostav i vyhod bitumoidov torfa [The effect of alkylation on the composition and yield of peat bitumen]. *Himija rastitel'nogo syr'ja*, 2009, no. 2, pp. 125-130.
6. Trapeznikova E. F., Smol'nikova T. V., Hafizova S. R. i dr. Perspektiva primenenija ceolitsoderzhashhih katalizatorov v processe alkilirovanija [The prospect of using zeolite-containing catalysts in the alkylation process]. *Jel'ektronnyj nauchnyj zhurnal Neftegazovoe delo*, 2018, no. 4, pp. 117-143. DOI 10.17122/ogbus-2018-4-117-143.
7. Travkina O. S., Agliullin M. R., Kutepov B. I. Sovremennoe sostojanie promyshlennogo proizvodstva i primenenija ceolitsoderzhashhih adsorbentov i katalizatorov v Rossii [The current state of industrial production and application of zeolite-containing adsorbents and catalysts in Russia]. *Kataliz v promyshlennosti*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 297-307.
8. Bykov V. I., Beljaev B. A., Butenko T. A. Novye geterogennye katalizatory alkilirovanija na osnove pentahlorida niobija [New heterogeneous alkylation catalysts based on niobium pentachloride]. *Kinetika i kataliz*, 2018, vol. 59, no. 5, pp. 667-668.
9. Agaev A. A., Muradov M. M., Gadzhieva H. A., Garaeva I. Je. Alkilirovanie 2-metilfenola normal'nymi spirjami S1-S3 nad Pd-HCVM [Alkylation of 2-methylphenol with normal C1-C3 alcohols over Pd-HCBM]. *Bashkirskij himicheskij zhurnal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 12-14.
10. Gadzhieva H., Muradov M., Nazarova M., Agaev A. Kataliticheskoe alkilirovanie 2-metilfenola propanolami [Catalytic alkylation of 2-methylphenol with propanols]. *Annali d'Italia*, 2020, no. 11-1, pp. 9-11.
11. Koshkin S. A. *Analiz i optimizacija promyshlennoj tehnologii poluchenija jetilbenzola na ceolitsoderzhashhih katalizatorah: avtoreferat dis. ... kand. tehn. nauk* [Analysis and optimization of industrial technology for the production of ethylbenzene on zeolite-containing catalysts: auto-ref. dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 2017. 17 p.
12. Pavlov M. L., Basimova R. A., Shavaleev D. A., Jershtejn A. S. Razrabotka katalizatora i processa zhidkofaznogo alkilirovanija benzola jetilenom i jetan-jetilenovoj frakciej piroliza uglevodorodov [Development of a catalyst and a process for liquid-phase alkylation of benzene with ethylene and ethane-ethylene fraction of pyrolysis of hydrocarbons]. *Neftehimija*, 2019, vol. 59, no. 4, pp. 417-422.
13. Shkuropatov A. V., Popov A. G., Ivanova I. I. Alkilirovanie benzola propilenom na ierarhicheskikh ceolitah MWW, poluchennyh metodom rekristallizacii [Alkylation of benzene with propylene on hierarchical MWW zeolites obtained by recrystallization]. *Sovremennye molekulyarnye sita*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 100-107.
14. Juferova E. A., Devjatkov S. Ju., Fedorov S. P. i dr. Gibridnye katalizatory na osnove sul'fatirovannogo dioksida cirkonija i ceolita H-Beta dlja alkilirovanija izobutana izobutilenom [Hybrid catalysts based on sulfated zirconium dioxide and H-Beta zeolite for isobutane alkylation with isobutylene]. *Zhurnal prikladnoj himii*, 2017, vol. 90, no. 10, pp. 1323-1331.
15. Omarov Sh. O., Pavlov M. L., Basimova R. A. i dr. Sintez modificirovannogo katalizatora dlja processa zhidkofaznogo alkilirovanija benzola jetilenom [Synthesis of a modified catalyst for the process of liquid-phase alkylation of benzene with ethylene]. *Neftehimija*, 2020, vol. 60, no. 5, pp. 686-692.
16. Bykov V. I., Beljaev B. A. Novyj sposob prigotovlenija katalizatorov alkilirovanija na osnove geterogenizirovannogo AlCl₃ [A new method for the preparation of alkylation catalysts based on heterogeneous AlCl₃]. *Kinetika i kataliz*, 2021, vol. 62, no. 2, pp. 277-280.
17. Ponomareva O. A., Rodionova L. I., Shaposhnik P. A. i dr. Alkilirovanie anilina metanolom na ceolitah CsNaY s razlichnym razmerom kristallov [Alkylation of aniline with methanol on CsNaY zeolites with different crystal sizes]. *Sovremennye molekulyarnye sita*, 2022, vol. 4, no. 2, pp. 114-121.
18. Abdullaeva N. M., Voskressenskij L. G., Ahmedova N. F., Mamedov S. Je. Alkilirovanie toluola izopropanolom na ceolite tipa ZSM-5, modificirovannom lantanom [Alkylation of toluene with isopropanol on ZSM-5 type zeolite modified with lanthanum]. *Neftehimija*, 2021, vol. 61, no. 2, pp. 217-225.
19. Bok, T. O., Andriako E. P., Ivanova I. I. Vlijanie soderzhanija svjazujushhego na svoystva katalizatorov alkilirovanija benzola propilenom na osnove nanokristallicheskogo ceolita VEA [The effect of binder content on the properties of benzene alkylation catalysts with propylene based on nanocrystalline zeolite BEA]. *Sovremennye molekulyarnye sita*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 93-99.
20. Boronoev M. P., Ma G., Talanova M. Ju., Karahanov Je. A. Alkilirovanie aromatcheskih soedinenij v prisutstvii katalizatorov na osnove mezoporiistyh fenolformaldegidnyh polimerov [Alkylation of aromatic compounds in the presence of catalysts based on mesoporous phenol-formaldehyde polymers]. *Neftehimija*, 2018, vol. 58, no. 3, pp. 307-313.
21. Omarov Sh. O. O primenenii Mo/W v katalizatorah alkilirovanija izobutana olefinami [On the use of Mo/W in isobutane alkylation catalysts with olefins]. *Tradicii i innovacii: materialy nauchnoj konferencii, posvjashhennoj 187-j godovshhine obrazovanija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo instituta (tehniche-skogo universiteta), Sankt-Peterburg, 03-04 dekabrja 2015 goda*. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj tehnologicheskij institut (tehniceskij universitet), 2015. P. 73.
22. Kuznecov P. N., Kuznecova L. I., Kazbanova A. V. Kataliticheskaja izomerizacija alkanov na anionmodificirovannyh formah dioksida cirkonija [Catalytic isomerization of alkanes on anion-modified forms of zirconium dioxide]. *Himija v interesah ustojchivogo razvitija*, 2010, vol. 18, no. 3, pp. 299-311.
23. Doroshenko, A. A., Utemov A. V., Semikin K. V. Ceolitsoderzhashhie katalizatory, modificirovannye Ni, dlja alkilirovanija izobutana olefinami [Zeolite-containing catalysts modified with Ni for alkylation of isobutane with olefins]. *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo instituta (tehniceskogo universiteta)*, 2018, no. 46 (72), pp. 28-33.
24. Shirijazdanov R. R. *Nauchno-prikladnye osnovy processa alkilirovanija izobutana olefinami na ceolitsoderzhash-*

hih katalizatorah: dis. ... d-ra tehn. nauk [Scientific and applied fundamentals of the process of alkylation of isobutane with olefins on zeolite-containing catalysts: dis. ... Doctor of Technical Sciences]. Ufa, 2017. 412 p.

25. Temnikova V. A., Gerzeliev I. M., Bashanova M. N., Maksimov A. L. O kislitel'naja regeneracija ceolitnogo katalizatora alkilirovanija izobutana butilenami [Oxidative regeneration of the zeolite catalyst for alkylation of isobutane with butylenes]. *HHI Mendeleevskij s'ezd po obshej i prikladnoj himii: tezisy dokladov, Sankt-Peterburg, 09–13 sentjabrja 2019 goda: v 6 tomah*. Saint Petersburg, 2019, vol. 4. P. 117.

26. Gerzeliev I. M., Temnikova V. A., Bashanova M. N., Maksimov A. L. Vlijanie morfologii ceolitnyh katalizatorov na osnovnye pokazateli reakcii alkilirovanija izobutana butilenami [Influence of morphology of zeolite catalysts on the main parameters of the isobutane alkylation reaction with butylenes]. *Neftehimija*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 659-665. DOI 10.1134/S0028242119060029.

27. Gerzeliev I. M., Ostroumova V. A., Bashanova M. N.

Intensifikacija ionnogo obmena ceolita tipa FAU pri sinteze aktivnogo i selektivnogo katalizatora alkilirovanija izobutana butilenami [Intensification of ion exchange of FAU-type zeolite in the synthesis of an active and selective isobutane alkylation catalyst with butylenes]. *Neftehimija*, 2018, vol. 58, no. 4, pp. 469-473.

28. Torosjan G. O., Oganessian N. R. Alkilirovanie acetoususnogo jefira v uslovijah mezhfaznogo kataliza mikrovolnovym izlucheniem [Alkylation of acetoacetic ether under conditions of interphase catalysis by microwave radiation]. *Bashkirskij himicheskij zhurnal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 24-26.

29. Shavaleev D. A., Jershtejn A. S., Alehina I. E. i dr. Vlijanie uslovij termoparovoju obrabotki na svojstva ceolitsoderzhashhego katalizatora alkilirovanija benzola jetilenom [Influence of the conditions of the thermocouple treatment on the properties of a zeolite-containing catalyst for the alkylation of benzene with ethylene]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 86-90.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 15.08.2025; принята к публикации 15.09.2025

The article was submitted 23.06.2025; approved after reviewing 15.08.2025; accepted for publication 15.09.2025

Информация об авторе / Information about the author

Татьяна Владимировна Сальникова – кандидат технических наук; доцент кафедры химической технологии переработки нефти и газа; Астраханский государственный технический университет; t_salnikowa@mail.ru

Tatyana V. Salnikova – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Refining; Astrakhan State Technical University; t_salnikowa@mail.ru

