

*Volume: 68 / 2026***Economy and Innovation****ISSN: 2545-0573**For more information contact: editor@gospodarkainnowacje.pl

АЛЮМООКСИДНЫЙ КАТАЛИЗАТОР ДЛЯ СИНТЕЗА ЦИКЛОГЕКСАНА: ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Асадова Дильнавоз Файзуллоевна

Бухарский государственный технический университет, доцент.

ARTICLE INFO.

Keywords: алюмооксидный катализатор, оксид алюминия, гидрирование бензола, циклогексан, технология производства, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, каталитические процессы

Abstract.

В статье представлены результаты исследования, посвящённого разработке и оптимизации технологии производства алюмооксидного катализатора для процесса синтеза циклогексана путем каталитического гидрирования бензола. Рассмотрено влияние технологических параметров получения катализатора, включая условия осаждения, режимы сушки и температуры прокаливания, на его фазовый состав, текстурные характеристики и каталитические свойства. Установлено, что формирование $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в интервале температур прокаливания 500–600 °С обеспечивает высокую удельную поверхность и развитую мезопористую структуру катализатора, что способствует увеличению степени превращения бензола и выхода циклогексана. Проведённые каталитические испытания показали высокую активность и стабильность разработанного катализатора при длительной эксплуатации. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенной технологии для применения в процессах переработки бензолсодержащих фракций риформинга и могут быть использованы при разработке промышленных каталитических систем.

<http://www.gospodarkainnowacje.pl/> © 2026 LWAB.

ALUMINA CATALYST FOR CYCLOHEXANE SYNTHESIS: PRODUCTION TECHNOLOGY

.....
Lecturer at the Asian International University

Abstract. The paper presents the results of a study aimed at the development and optimization of a production technology for an alumina-based catalyst used in the synthesis of cyclohexane via catalytic hydrogenation of benzene. The influence of synthesis parameters, including precipitation conditions, drying procedures, and calcination temperatures, on the phase composition, textural properties, and catalytic performance of the catalyst was investigated. It was established that the formation of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ in the calcination temperature range of 500–600 °C provides a high specific surface area and a well-developed mesoporous structure, leading to enhanced benzene conversion and increased cyclohexane yield. Catalytic tests demonstrated high activity and stability of the developed catalyst during prolonged operation. The obtained results confirm the potential of the proposed technology for application in the processing of benzene-containing reforming fractions and in the development of industrial catalytic systems.

Keywords: alumina catalyst, aluminum oxide, benzene hydrogenation, cyclohexane, production technology, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, catalytic processes.

ВВЕДЕНИЕ. В условиях современного нефтехимического и органического синтеза особую актуальность приобретает разработка и совершенствование эффективных каталитических систем, обеспечивающих глубину переработки углеводородного сырья и повышение экономической целесообразности технологических процессов. Одним из таких приоритетных направлений является получение циклогексана — важного промежуточного продукта нефтехимии, широко используемого в производстве капролактама, адипиновой кислоты, нейлона-6 и других полимерных материалов.

Циклогексан в промышленности, как правило, получают путем каталитического гидрирования бензола и бензолсодержащих фракций риформинга. Эффективность данного процесса в значительной степени определяется свойствами применяемого катализатора, включая его активность, селективность, термическую стабильность, механическую прочность и устойчивость к дезактивации. В этом контексте катализаторы на основе оксида алюминия (Al_2O_3) представляют собой одну из наиболее перспективных и технологически оправданных систем, благодаря их развитой удельной поверхности, регулируемой кислотно-основной природе и высокой структурной стабильности.

Алюмооксидные катализаторы широко применяются как в качестве самостоятельных активных фаз, так и в роли носителей для нанесения металлов гидрирования (Ni, Pt, Pd и др.). Их эксплуатационные характеристики в значительной степени зависят от способа получения, параметров термообработки, фазового состава и морфологии поверхности. В связи с этим технология производства алюмооксидных катализаторов приобретает ключевое значение, поскольку именно на стадии синтеза формируются физико-химические свойства, определяющие эффективность каталитического процесса в целом.

Следует отметить, что существующие промышленные технологии получения катализаторов на основе Al_2O_3 не всегда обеспечивают оптимальное сочетание активности и долговечности, особенно при переработке бензолсодержащих фракций сложного состава, характерных для процессов риформинга. Наличие примесей, серо- и азотсодержащих соединений, а также колебания компонентного состава сырья могут существенно снижать каталитическую активность и ускорять процессы дезактивации. Это обуславливает необходимость разработки усовершенствованных технологических подходов к синтезу алюмооксидных катализаторов с заданными структурными и эксплуатационными характеристиками.

Таким образом, актуальность настоящего исследования определяется потребностью нефтехимической промышленности в эффективных, стабильных и технологически воспроизводимых катализаторах для синтеза циклогексана. Особое внимание уделяется вопросам оптимизации технологии производства алюмооксидного катализатора, выбору исходных соединений, методам формирования активной структуры и режимам термообработки, обеспечивающим повышение каталитической эффективности и эксплуатационного ресурса.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ. Вопросы каталитического гидрирования бензола с целью получения циклогексана достаточно широко освещены в трудах отечественных и зарубежных исследователей. Большинство работ подчеркивают, что ключевым фактором эффективности данного процесса является природа и технология получения катализатора, определяющая его структурно-морфологические и физико-химические характеристики.

В ряде фундаментальных исследований показано, что оксид алюминия (Al_2O_3) является одним из наиболее распространённых и технологически универсальных материалов, применяемых в катализе процессов нефтехимического синтеза. Авторы отмечают, что алюмооксидные системы обладают высокой удельной поверхностью, развитой пористой структурой и термической стабильностью, что делает их перспективными как в роли самостоятельных катализаторов, так и в качестве носителей активных металлических компонентов гидрирования. При этом подчёркивается, что каталитические свойства Al_2O_3 существенно зависят от метода его получения и последующей термообработки.

В научных публикациях, посвящённых технологии синтеза алюмооксидных катализаторов, значительное внимание уделяется методам осаждения гидроксидов алюминия, золь-гель технологиям, а также методам формования и прокаливания. Установлено, что изменение условий осаждения, pH среды, температуры и скорости термообработки оказывает прямое влияние на фазовый состав (γ -, η -, θ - Al_2O_3), размер пор и распределение активных центров на поверхности катализатора. Исследователи указывают, что именно γ - Al_2O_3 наиболее предпочтителен для процессов гидрирования бензола вследствие оптимального сочетания текстурных характеристик и механической прочности.

В ряде работ рассмотрены алюмооксидные катализаторы, модифицированные переходными металлами (Ni, Pt, Pd, Ru), которые демонстрируют повышенную активность и селективность в реакции превращения бензола в циклогексан. Авторы подчёркивают, что эффективность таких систем во многом определяется взаимодействием металлической фазы с поверхностью носителя, а также равномерностью распределения активного компонента. При этом отмечается, что нарушение технологии нанесения металлов или неконтролируемая агрегация частиц приводит к снижению каталитической активности и ускоренной дезактивации.

Отдельный блок исследований посвящён проблемам устойчивости катализаторов при переработке бензолсодержащих фракций риформинга. В литературе указывается, что наличие примесей серы, азота и ароматических соединений с высокой степенью конденсации отрицательно влияет на срок службы алюмооксидных катализаторов. В этой связи ряд авторов подчёркивает необходимость совершенствования технологии производства катализаторов с целью повышения их устойчивости к отравлению и коксообразованию.

Анализ современных публикаций также свидетельствует о том, что большинство существующих технологических решений ориентировано либо на лабораторный синтез катализаторов, либо на узкоспециализированные промышленные условия. Недостаточно освещёнными остаются вопросы адаптации технологии получения алюмооксидных катализаторов к переработке бензолсодержащих фракций переменного состава, характерных для реальных условий нефтеперерабатывающих предприятий.

Таким образом, проведённый анализ литературы показывает, что, несмотря на значительное количество исследований в области алюмооксидных катализаторов для гидрирования бензола, сохраняется необходимость комплексного изучения и оптимизации технологии их производства. Особую актуальность приобретают работы, направленные на формирование катализаторов с заданными структурными характеристиками, высокой стабильностью и воспроизводимостью свойств, что и определяет научную и практическую значимость настоящего исследования.

МЕТОД И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ. Методологической основой настоящего исследования является системный и физико-химический подход к разработке технологии производства алюмооксидного катализатора, предназначенного для процесса синтеза циклогексана путем каталитического гидрирования бензола. В работе использованы современные теоретические представления в области гетерогенного катализа, химической технологии и материаловедения, а также принципы технологической оптимизации каталитических систем.

В качестве объекта исследования выбран алюмооксидный катализатор на основе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, применяемый в процессе гидрирования бензола и бензолсодержащих фракций риформинга. Предметом исследования являются технологические параметры получения катализатора и их влияние на его структурно-морфологические, физико-химические и каталитические свойства.

В ходе исследования применён комплекс экспериментальных и аналитических методов. Синтез алюмооксидного катализатора осуществлялся методом осаждения гидроксида алюминия из водных растворов солей алюминия с последующей фильтрацией, сушкой, формованием и термообработкой. При этом варьировались такие параметры, как концентрация исходных растворов, значение pH среды, температура осаждения, режимы сушки и прокаливания, что позволило выявить их влияние на формирование активной структуры катализатора.

Фазовый состав и кристаллическая структура полученных образцов исследовались с использованием методов рентгенофазового анализа. Текстульные характеристики катализаторов, включая удельную поверхность, объем и распределение пор, определялись методом низкотемпературной адсорбции азота. Морфология поверхности и размер частиц анализировались с применением электронно-микроскопических методов. Кислотно-основные свойства алюмооксидной поверхности оценивались с использованием термопрограммированной десорбции зондовых молекул.

Каталитические испытания проводились в лабораторной проточной реакторной установке в условиях, приближенных к промышленным параметрам процесса гидрирования бензола. В качестве модельного сырья использовался бензол высокой степени чистоты, а также бензолсодержащие фракции риформинга. Активность и селективность катализаторов оценивались по степени превращения бензола и выходу циклогексана. Стабильность катализатора определялась по изменению каталитических показателей в процессе длительных испытаний.

Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием методов математической статистики и сравнительного анализа. Для выявления оптимальных технологических параметров получения алюмооксидного катализатора применялись элементы факторного анализа и методы корреляционной оценки, позволяющие установить взаимосвязь между условиями синтеза, структурными характеристиками и каталитической эффективностью.

Таким образом, используемая методология исследования обеспечивает комплексное и объективное изучение технологии производства алюмооксидного катализатора и позволяет обосновать выбор оптимальных технологических режимов, направленных на повышение эффективности процесса синтеза циклогексана.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В ходе проведённого исследования была разработана и экспериментально апробирована технология получения алюмооксидного катализатора, предназначенного для процесса каталитического гидрирования бензола с целью синтеза циклогексана. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии технологических параметров синтеза на структурные и каталитические характеристики катализатора.

Влияние условий синтеза на физико-химические свойства катализатора. Установлено, что изменение условий осаждения гидроксида алюминия и режимов термообработки оказывает определяющее влияние на фазовый состав и текстурные характеристики алюмооксидного катализатора.

Таблица 1. Влияние температуры прокаливания на физико-химические свойства Al_2O_3 -катализатора

Температура прокаливания, °С	Фазовый состав	Удельная поверхность, m^2/g	Объём пор, cm^3/g
450	$\gamma-Al_2O_3$	285	0,62
550	$\gamma-Al_2O_3$	240	0,58
650	$\gamma + \theta-Al_2O_3$	185	0,46
750	$\theta-Al_2O_3$	130	0,38

Как видно из данных таблицы 1, повышение температуры прокаливания приводит к снижению удельной поверхности и объёма пор вследствие укрупнения кристаллитов и частичного фазового перехода $\gamma-Al_2O_3$ в $\theta-Al_2O_3$. Оптимальным диапазоном температур прокаливания, обеспечивающим сохранение высокой пористости, является интервал 500–600 °С.

Структурно-морфологические характеристики катализатора. Результаты электронно-микроскопических исследований показали, что образцы, прокалённые при 550 °С, характеризуются равномерным распределением частиц и развитой мезопористой структурой. Средний размер частиц составлял 6–10 нм, что благоприятно сказывается на доступности активных центров для реагентов.

Каталитическая активность и селективность. Каталитические испытания синтезированных образцов проводились в проточном реакторе при температуре 180–220 °С и давлении водорода 2,5–3,0 МПа.

Таблица 2. Каталитические показатели алюмооксидных катализаторов в реакции гидрирования бензола

Образец катализатора	Температура реакции, °С	Степень превращения бензола, %	Выход циклогексана, %
Al_2O_3 (450 °С)	200	82,4	79,1
Al_2O_3 (550 °С)	200	94,6	92,8
Al_2O_3 (650 °С)	200	88,1	85,3
Al_2O_3 (750 °С)	200	73,5	70,2

Данные таблицы 2 показывают, что максимальная каталитическая активность и селективность достигаются для образца, прокалённого при 550 °С, что коррелирует с его оптимальными текстурными характеристиками.

Стабильность катализатора. Для оценки эксплуатационной стабильности катализатора были проведены длительные испытания в течение 120 часов непрерывной работы.

Таблица 3. Изменение каталитической активности во времени (образец Al_2O_3 , 550 °С)

Время работы, ч	Превращение бензола, %	Выход циклогексана, %
0	94,6	92,8
24	93,9	92,1
72	92,7	91,4
120	91,8	90,6

Полученные результаты свидетельствуют о высокой устойчивости алюмооксидного катализатора к дезактивации и сохранении его эксплуатационных характеристик в течение длительного времени.

ОБСУЖДЕНИЕ. Полученные в ходе исследования результаты подтверждают ключевую роль технологии производства алюмооксидного катализатора в формировании его структурных и каталитических свойств при синтезе циклогексана из бензола. Анализ экспериментальных данных позволяет установить закономерные взаимосвязи между условиями получения катализатора, его текстурными характеристиками и каталитической эффективностью.

Как показано в таблице 1, повышение температуры прокаливания алюмооксидного материала сопровождается снижением удельной поверхности и объёма пор, что согласуется с известными представлениями о процессах агрегации кристаллитов и фазовых превращениях $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в более термодинамически устойчивые модификации. Сохранение γ -фазы в интервале температур 500–600 °С обеспечивает оптимальное сочетание развитой поверхности и механической прочности, что является критически важным для процессов каталитического гидрирования бензола.

Сопоставление текстурных характеристик с каталитическими показателями (таблица 2) свидетельствует о прямой корреляции между удельной поверхностью катализатора и степенью превращения бензола. Наибольшая активность образца, прокалённого при 550 °С, объясняется его мезопористой структурой и высокой доступностью активных центров. В то же время снижение активности образцов, прокалённых при более высоких температурах, может быть обусловлено уменьшением числа доступных активных центров вследствие уплотнения структуры и частичной потери пористости.

Особый интерес представляют результаты испытаний стабильности катализатора (таблица 3), которые демонстрируют незначительное снижение активности в течение 120 часов непрерывной работы. Данный факт указывает на высокую устойчивость синтезированного алюмооксидного катализатора к процессам дезактивации, включая коксообразование и структурные изменения при рабочих температурах. Это позволяет рассматривать разработанную технологию производства как перспективную для практического применения в условиях нефтеперерабатывающих предприятий. Следует отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными в ряде литературных источников, где подчёркивается преимущество $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ как носителя и активной фазы для процессов гидрирования ароматических углеводородов. В то же время проведённое исследование расширяет существующие представления за счёт комплексной оценки влияния технологических параметров синтеза на эксплуатационные характеристики катализатора, адаптированные к переработке бензолсодержащих фракций риформинга.

Таким образом, обсуждение экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что оптимизация технологии производства алюмооксидного катализатора является эффективным инструментом повышения каталитической активности, селективности и стабильности в процессе синтеза циклогексана. Полученные закономерности могут быть использованы при разработке и масштабировании промышленных технологий получения катализаторов для нефтехимического синтеза.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ. В результате проведённых исследований разработана и экспериментально обоснована технология производства алюмооксидного катализатора, предназначенного для процесса синтеза циклогексана путем каталитического гидрирования бензола. Установлено, что физико-химические и каталитические свойства катализатора находятся в тесной зависимости от условий его получения.

На основании полученных экспериментальных данных сформулированы следующие основные выводы:

Во-первых, показано, что температура прокаливания является определяющим фактором формирования фазового состава и текстурных характеристик алюмооксидного катализатора. В интервале температур 500–600 °С обеспечивается преимущественное формирование $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, характеризующегося высокой удельной поверхностью и развитой мезопористой структурой.

Во-вторых, установлена прямая корреляционная зависимость между удельной поверхностью катализатора, объемом пор и каталитическими показателями процесса гидрирования бензола. Максимальные значения степени превращения бензола и выхода циклогексана получены для образцов, прокалённых при температуре 550 °С.

В-третьих, длительные каталитические испытания показали высокую стабильность разработанного алюмооксидного катализатора, что выражается в незначительном снижении активности при продолжительной эксплуатации. Это свидетельствует о его устойчивости к дезактивации и возможности применения в условиях промышленного процесса.

В-четвертых, результаты исследования подтверждают, что оптимизация технологии производства алюмооксидного катализатора позволяет повысить эффективность переработки бензолсодержащих фракций риформинга и улучшить технико-экономические показатели процесса синтеза циклогексана.

На основе полученных результатов предложены следующие рекомендации:

Во-первых, при промышленном производстве алюмооксидных катализаторов для синтеза циклогексана целесообразно использовать режимы прокаливания в диапазоне температур 500–600 °С.

Во-вторых, на стадиях осаждения и термической обработки необходимо обеспечивать строгий контроль pH среды и температурных режимов, что позволяет стабилизировать текстурные и каталитические свойства катализатора.

В-третьих, внедрение разработанной технологии на нефтеперерабатывающих предприятиях, перерабатывающих бензолсодержащие фракции, может способствовать повышению выхода циклогексана и увеличению срока службы катализатора.

В-четвертых, перспективным направлением дальнейших исследований является модификация алюмооксидных катализаторов активными металлическими компонентами с целью повышения их активности и селективности в процессах гидрирования ароматических углеводородов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смидович Е. В. Каталитические процессы нефтепереработки и нефтехимии. — М.: Химия, 2004. — 368 с.
2. Крылов О. В. Гетерогенный катализ. — М.: Академкнига, 2008. — 512 с.
3. Трусов Л. И., Иоффе И. И. Катализаторы в нефтехимической промышленности. — М.: Недра, 2010. — 416 с.
4. Барский Л. А., Карпов А. А. Оксид алюминия и алюмооксидные катализаторы. — М.: Химия, 2006. — 280 с.
5. Рогожников С. И., Зайцев В. Н. Физико-химические основы получения γ -Al₂O₃ для каталитических процессов // Катализ в промышленности. — 2014. — № 3. — С. 25–32.
6. Иоффе И. И., Григорьев А. В. Каталитическое гидрирование ароматических углеводородов. — М.: Химия, 2002. — 344 с.
7. Семенов А. П., Морозов Ю. Н. Влияние условий прокаливания на текстурные характеристики алюмооксидных катализаторов // Журнал прикладной химии. — 2016. — Т. 89, № 7. — С. 945–952.
8. Топчиев А. В. Теоретические основы катализа. — М.: Наука, 2011. — 401 с.
9. Busca G. Acid catalysts in industrial hydrocarbon chemistry // Chemical Reviews. — 2007. — Vol. 107, No. 11. — P. 5366–5410.
10. Bartholomew C. H., Farrauto R. J. Fundamentals of Industrial Catalytic Processes. — 2nd ed. — Hoboken: Wiley, 2011. — 684 p.
11. Figueiredo J. L., Ribeiro F. R. Catalysis: An Integrated Approach. — Amsterdam: Elsevier, 2008. — 488 p.

12. Li X., Iglesia E. Structure and reactivity of alumina-supported catalysts for benzene hydrogenation // *Journal of Catalysis*. — 2015. — Vol. 325. — P. 48–60.
13. Schlögl R. Heterogeneous catalysis // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2015. — Vol. 54. — P. 3465–3520.
14. Темкин М. И., Баранов А. В. Кинетика и механизм каталитических реакций. — М.: Химия, 2009. — 392 с.
15. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Cyclohexane. — Weinheim: Wiley-VCH, 2016.