

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-3-58-69>



УДК 665.656.2

## Алюмооксидный носитель для катализатора низкотемпературной изомеризации углеводородов

Н. Тагандурдыева<sup>@</sup>, Н.В. Мальцева, Т.А. Вишневская, В.Н. Нараев,  
А.Ю. Постнов

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, 190013 Россия

<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: jahana\_18101993@mail.ru

**Цели.** Определение условий получения гранулированного  $\eta$ - $Al_2O_3$ -носителя, исследование его структурно-прочностных свойств и оценка активности в модельном процессе изомеризации *n*-бутана.

**Методы.** Образцы, содержащие тригидроксид алюминия байеритной структуры, синтезированы осаждением из водных растворов нитрата алюминия аммиаком в изотермических условиях при постоянном значении pH. Экструзионным методом получены образцы гранулированного носителя при варьировании состава формовочных паст: соотношения количества байерит- и  $\eta$ - $Al_2O_3$ -содержащих компонентов и введения поливинилового спирта.

**Результаты.** Оценено влияние условий приготовления на структурно-прочностные свойства гранул активного  $Al_2O_3$ . Образцы алюмооксидного носителя испытаны в модельной реакции низкотемпературной изомеризации *n*-бутана, показана их достаточно высокая селективность и перспективность при получении катализаторов низкотемпературной изомеризации углеводородов.

**Выводы.** Увеличение содержания поливинилового спирта в формовочной пасте от 0.4 до 1.8 масс. % сопровождается смещением преобладающих размеров мезопор в интервале 10–50 нм и пор в интервале 50–80 нм в большую сторону, что объясняет высокие значения всех регистрируемых показателей процесса изомеризации *n*-бутана.

**Ключевые слова:** изомеризация, *n*-алканы, носитель катализатора изомеризации, оксид алюминия, байерит.

**Для цитирования:** Тагандурдыева Н., Мальцева Н.В., Вишневская Т.А., Нараев В.Н., Постнов А.Ю. Алюмооксидный носитель для катализатора низкотемпературной изомеризации углеводородов. *Тонкие химические технологии*. 2020;15(3):58-69. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-3-58-69>

# Aluminum oxide carrier for a catalyst for low-temperature isomerization of hydrocarbons

Nurjahan Tagandurdyeva<sup>@</sup>, Natalya V. Maltseva, Tatyana A. Vishnevskaya, Vyacheslav N. Narayev, Arkady Yu. Postnov

Saint-Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, 190013 Russia

<sup>@</sup>Corresponding author, e-mail: jahana\_18101993@mail.ru

**Objectives.** Determine the necessary conditions for obtaining a granulated  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  carrier, investigate its structural and strength properties, and evaluate its activity for the model *n*-butane isomerization reaction.

**Methods.** Samples containing bayerite structure aluminum trihydroxide were synthesized by precipitation from aqueous solutions of aluminum nitrate with ammonia under isothermal conditions at a constant pH value. The samples of the granulated carrier were obtained using an extrusion method when the composition of molding pastes was varied by tuning the ratio of bayerite- and  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -containing components and introducing polyvinyl alcohol.

**Results.** The influence of the preparation conditions on the structural and strength properties of the active  $\text{Al}_2\text{O}_3$  granules is evaluated. Samples of the aluminum oxide carrier were tested for a model reaction of low-temperature isomerization of *n*-butane, demonstrating a sufficiently high selectivity and reasonable prospects for use as catalysts for low-temperature isomerization of hydrocarbons.

**Conclusions.** Increasing the content of the polyvinyl alcohol in the molding paste from 0.4 to 1.8 wt % is accompanied by an increase in the predominant sizes of the mesopores in the range of 10–50 nm and pores in the range of 50–80 nm, explaining the high values of all recorded parameters for the process of isomerization of *n*-butane.

**Keywords:** isomerization, *n*-alkanes, the carrier of the catalyst for isomerization, aluminum oxide, bayerite.

**For citation:** Tagandurdyeva N., Maltseva N.V., Vishnevskaya T.A., Narayev V.N., Postnov A. Yu. Aluminum oxide carrier for a catalyst for low-temperature isomerization of hydrocarbons. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2020;15(3):58-69 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-3-58-69>

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс изомеризации линейных алканов в производстве автомобильных топлив является ключевой стадией, обеспечивающей превращение низкооктановых неразветвленных парафинов в высокооктановые разветвленные молекулы. Поэтому данный процесс может рассматриваться как эффективный и экономически приемлемый способ увеличения октанового числа моторного бензина с маловероятным образованием ароматических соединений [1].

Процесс изомеризации протекает на кислотных катализаторах и может инициироваться сильными кислотами Льюиса, катализаторами Фриделя-Крафтса, при относительно низких температурах, существенным недостатком которых является их нестабильность и корродирующее действие [2, 3]. Поэтому в промышленных процессах изомеризации в качестве катализаторов обычно используют твердые кислоты с нанесенной платиной [4, 5]. Платина,

нанесенная на хлорированный оксид алюминия или цеолит, является наиболее часто используемой каталитической системой для рассматриваемого процесса [6]. Цеолиты менее кислотны, чем хлорированные оксиды алюминия, и, как следствие, для протекания реакции изомеризации требуют высоких температур (250–400 °C), что менее благоприятно для получения разветвленных изомеров [3, 7].

Наиболее активными катализаторами из предлагаемых в настоящее время для процесса изомеризации являются хлорированные алюмоплатиновые катализаторы ( $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cl}$ ). Повышенная активность данных катализаторов позволяет вести изомеризацию при низких температурах 120–180 °C с высокой степенью превращения ( $X = 28\%$ ) и селективностью ( $S = 98\%$ ) по целевому продукту [7, 8].

В качестве носителей для алюмоплатиновых катализаторов широко используется оксид алюминия, в частности его модификации:  $\gamma$ - и  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Однако оксид  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  в ряде случаев обладает преимуществами

по сравнению с  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Гранулированный оксид  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  характеризуется как высокой удельной поверхностью ( $S_{\text{уд}} = 300\text{--}400 \text{ м}^2/\text{г}$ ), так и наличием объема крупных мезопор с размером более 25 нм ( $V_{\text{мезопор}} = 0.10\text{--}0.25 \text{ см}^3/\text{г}$ ), а также повышенной Льюисовской кислотностью [2].

Оксид  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  получают преимущественно термической обработкой тригидроксида алюминия байеритной структуры. Наиболее распространенным методом получения байерита является его осаждение из водных растворов солей алюминия растворами аммиака или щелочей [9]. Осаждение гидроксида алюминия проводят при значении  $\text{pH} = 10\text{--}11$ , при котором байерит выпадает в виде крупных, мало гидратированных и рыхлоупакованных кристаллов, промежутки между которыми заполнены коллоидно-связанной водой. Однако связь ее в байерите, в отличие от псевдобемита, менее прочна. Поэтому осадки байерита значительно более тиксотропны и под воздействием сдвиговых нагрузок, имеющих место при приготовлении формовочных паст и их экструдировании, резко разжижаются, а при снижении сдвиговых нагрузок так же резко структурируются. Это значительно усложняет процесс формования рассматриваемого тригидроксида [10]. Обнаружено, что это свойство проявляется в значительно большей мере у формовочных паст из байерита, осаждаемого из солей алюминия аммиаком, по сравнению с таковым, полученным с использованием гидроксида натрия в качестве осадителя. Однако в последнем случае требуется тщательная отмывка осадка ввиду существования жестких ограничений по примеси натрия (не более 0.02 масс. %) для носителей катализаторов изомеризации [11]. Поэтому приоритетным является осаждение байерита аммиаком, при этом высокая структурированность паст, получаемых из гидроксида, осложняет процесс их экструдирования и ставит задачу нахождения условий приготовления гранулированного оксида  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , соответствующего требованиям пригодности для катализатора изомеризации углеводородов, в том числе по примеси натрия.

Перспективным способом регулирования свойств формовочных паст в технологии гранулированных носителей на основе оксида алюминия является изменение свойств как дисперсной фазы путем введения в качестве гетерогенной добавки порошка оксида алюминия [12], так и дисперсионной среды путем введения в качестве ПАВ водорастворимого органического полимера – поливинилового спирта (ПВС). При этом важным фактором является содержание дисперсной фазы в системе [13].

Цель настоящей работы состояла в определении условий получения гранулированного  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -носителя,

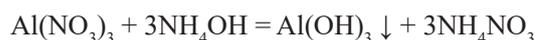
исследовании его структурно-прочностных свойств и оценке активности в модельном процессе изомеризации *n*-бутана.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

*Получение экспериментальных байеритсодержащих образцов методом осаждения*

Образцы, содержащие тригидроксид алюминия байеритной структуры, получали путем осаждения из раствора соли алюминия раствором аммиака. В качестве исходного реактива для приготовления раствора соли концентрацией 5 моль/л был использован 9-водный нитрат алюминия  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (ГОСТ 3757-75, партия 25, ООО «НеваРеактив», Россия, чистота 97%). Для приготовления раствора аммиака концентрацией 5 моль/л использовался 25% раствор аммиака  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (ГОСТ 3760-79, партия 49, ООО «НеваРеактив», Россия, чистота 25%). Нижеприведенные условия приготовления байеритсодержащих образцов обоснованы результатами исследований, изложенными в [14].

Смешение растворов осуществляли в стеклянном реакторе, содержащем буферный аммиачный раствор с  $\text{pH} = 10.3\text{--}10.5$  при постоянном перемешивании (скорость вращения мешалки ~ 300 об/мин). Одновременную подачу растворов нитрата алюминия и аммиака в реактор осуществляли перистальтическим насосом с расходом 1 и 5 мл/мин, соответственно. Постоянное значение  $\text{pH} = 10.5 \pm 0.1$  реакционной среды контролировали с интервалом 30 минут. Заданное значение  $\text{pH}$  создавали за счет 5-кратного избытка аммиака относительно стехиометрии реакции:



Температуру реакционной среды при ее значении  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  поддерживали при помощи термостаба. В изотермических условиях продолжительность процесса осаждения составляла 2 ч, а продолжительность процесса старения полученного осадка – 24 ч.

Полученный осадок отделяли на воронке Бюхнера и промывали до нейтральной реакции среды. Осадок высушивали при температуре  $100\text{--}110^\circ\text{C}$  до постоянной массы. Содержание байерита в синтезированном осадке гидроксида составило  $(85 \pm 2)$  масс. % [14].

*Получение систем, содержащих  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$*

В ходе работы, экструзионным методом были получены серии носителей (табл. 1), различающиеся между собой соотношением количеств вводимых байерит- и  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -содержащих компонентов.

Для получения гранул носителей были приготовлены формовочные пасты с использованием порошкообразных компонентов: байеритсодержащего гидроксида (далее байерит), высушенного при  $110^\circ\text{C}$ ;  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ -содержащего оксида алюминия

Таблица 1. Составы формовочных паст  
Table 1. Compositions of molding pastes

№ образца Sample No.	Байерит Bayerite	$\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$	Влажность,* масс. % Humidity,* wt %	ПВС, масс. % (по отношению к байериту) PVA**, wt % (in relation to bayerite)
	масс. % (по $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) wt % (according to $\text{Al}_2\text{O}_3$ )			
1	20	80	49.5	2.7
2	40	60	51	
3	60	40	52	
4	80	20	55	
5	100	0	56	

\*отношение суммы масс воды, содержащихся в каждом компоненте, к сумме масс всех компонентов / ratio of the total mass of water contained in each component to the total mass of all components;

\*\*PVA – polyvinyl alcohol.

(далее  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), полученного прокаливанием синтезированного гидроксида при 500 °С.

При затворении дистиллированной водой порошка байерита или его смесей с 20–80 масс. % порошка оксида, их дальнейшей гомогенизации с приложением сдвиговых нагрузок, к сожалению, не удалось получить пасты, пригодные для экструдирования.

Использование в качестве пластификатора пятипроцентного раствора поливинилового спирта в дистиллированной воде позволило сформовать полученные гомогенизированные пасты в шнековом грануляторе через фильеру диаметром 2 мм.

Экструдаты, после «проявления» при  $(20 \pm 2)$  °С в течение 16–18 ч и высушивания при 100–110 °С до постоянной массы, термообработывали при 280–290 °С и 500–510 °С в течение 4 ч при каждой температуре (скорость подъема температуры 10 °С/мин).

#### Методы исследования образцов

Дифференциально-термический (ДТА) и термометрический анализ синтезированных образцов байерита проводили в атмосфере воздуха на дериватографе SHIMADZU DTG-60H при скорости нагрева 10 °/мин от комнатной температуры до 800 °С. Масса образцов составляла  $\approx (15\text{--}50)$  мг. Температуру определяли с точностью до 1 °С, изменение массы до 0.1 %. Количественно фазовый состав образцов определяли, исходя из наблюдаемых потерь массы в результате термолитиза соединений, входящих в состав образца.

Фазовый состав высушенных образцов байерита исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью многофункционального рентгеновского диффрактометра «RigakuSmartLab 3» (Rigaku Corporation, Токио, Япония) с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -монохроматического излучения в интервале углов  $(10\text{--}80)^\circ (2\theta)$  со скоростью сканирования 10 °/мин. Объем загружаемого образца составлял не менее 0.1 см<sup>3</sup>, угловое разрешение рефлексов до

0.01°. Расшифровка рентгенограмм выполнена с помощью программы Crystallographica Search-Match v. 2,0,3,1 Oxford Cryosystems. При расшифровке использовали стандартную базу данных.

Фракционный состав порошков синтезированных образцов байерита и  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ , использованных для приготовления формовочных паст, определяли методом лазерного рассеивания на приборе SALD-2201 Laser Diffraction Particle Size Analyzer (SHIMADZU, Япония).

Функция кислотности поверхности ( $H_0$ ) образцов носителей была определена методом рН-метрии с использованием рН-метра-милливольтметра рН-673.М со стеклянным электродом ЭВЛ-1МЗ в водной среде, имеющей рН<sub>Н<sub>2</sub>О</sub> в интервале 6.4–6.6 по методике, представленной в [15].

Удельная поверхность ( $S_{уд}$ ) гранулированных экспериментальных образцов была определена по тепловой десорбции азота по односточному методу Брюнера-Эммета-Теллера.

Испытания гранулированных образцов на прочность при раздавливании «по торцу» ( $P_{\square}$ ) были проведены с помощью прибора экстензографа МП-2С по методике, описанной в [17].

Определение суммарного объема пор ( $V_{\Sigma}$ ) гранулированных образцов по влагоемкости было проведено с использованием воды в качестве пикнометрической жидкости [18].

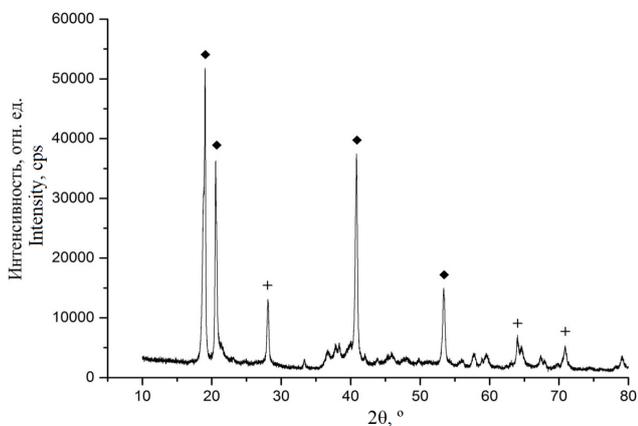
Исследования распределения объема пор по их размерам проводили методом азотной порометрии. Изотермы адсорбции/десорбции азота определялись с использованием установки «Autosorb 6iSA» (Quantachrome Instruments, США) после дегазации образцов в вакууме при 250 °С в течение 1 часа. Удельная поверхность, удельный объем пор (заполнение пор адсорбатом при его относительном давлении  $\approx 1$ ) и средний эффективный размер пор определялись методом теории функционала плотности (DFT – density functional theory) [16].

Для определения относительной активности образцов носителей и оценки таким образом перспективности получения на их основе эффективных кислотных катализаторов изомеризации, в соответствии с рекомендациями [19], проводили тестовые испытания в реакции изомеризации *n*-бутана по методике НПФ «ОЛКАТ». Испытания проводили при загрузке носителя катализатора 3.0 см<sup>3</sup> при следующих условиях: температура на входе в реактор составляла 75 °С, объемная скорость подачи *n*-бутана (в расчете на жидкость) – 1 ч<sup>-1</sup>, мольное отношение Н<sub>2</sub> : *n*-бутан поддерживалось равным 1 : 1. Анализ на содержание изомеризата в газовой смеси на выходе из реактора осуществляли методом газовой хроматографии [19].

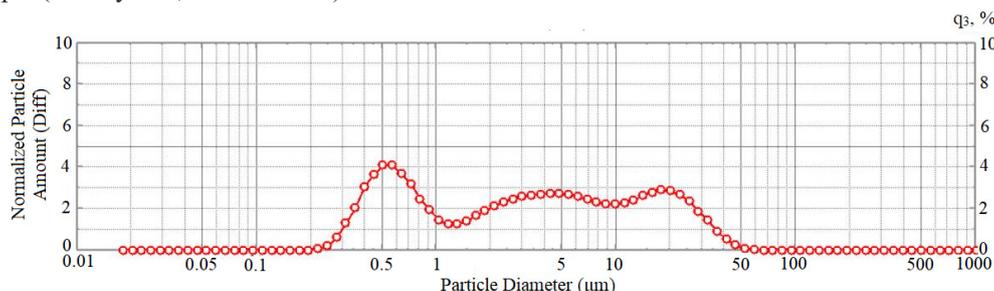
Исследование проводили на научно-исследовательском оборудовании, предоставленном Инжиниринговым центром Санкт-Петербургского Государственного Технологического Института (Технического Университета) и НПФ «ОЛКАТ».

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования фазового состава синтезированных образцов гидроксида алюминия методом рентгенофазового анализа приведены на рис. 1. На приведенной рентгенограмме определены дифракционные максимумы, характерные для гидроксида алюминия байеритной и бемитной структуры.

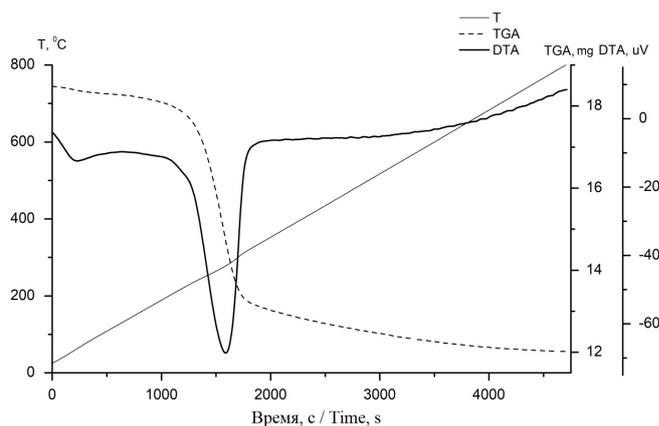


**Рис. 1.** Рентгенограмма синтезированного образца байерита (♦ – байерит; + – бемит).  
**Fig. 1.** X-ray diffraction pattern of the synthesized bayerite sample (♦ – bayerite; + – boehmite).



**Рис. 3.** Дифференциальная кривая распределения частиц порошка байерита по размерам.  
**Fig. 3.** Differential particle size distribution curve of bayerite powder.

Исследование образцов гидроксида алюминия методом ДТА позволило количественно оценить содержание в них тригидроксида алюминия байеритной структуры. Согласно расчетам, выполненным по потерям массы, осаждение в условиях эксперимента (за 2 и 24 ч проведения процесса осаждения и старения, соответственно) приводит к образованию (85 ± 2) масс. % байерита. Дериватограмма полученного осадка приведена на рис. 2.

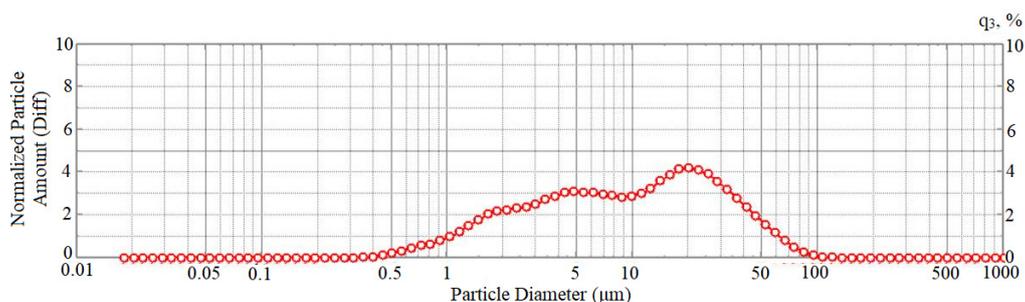


**Рис. 2.** Дериватограмма синтезированного образца байерита.  
**Fig. 2.** Derivatogram of a synthesized bayerite sample.

При нагревании на кривой ДТА наблюдаются два эндоэффекта с минимумами при 63 °С и 278 °С. Первый из них связан с удалением физически адсорбированной воды. Из литературных данных [9, 10, 20] известно, что фазовый переход байерита в η-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> происходит в интервале температур 250–350 °С, что объясняет второй эндотермический эффект.

Результаты количественной оценки фазового состава продукта прокаливания синтезированного порошка байерита при 500 °С показали содержание 80 масс. % η-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 20 масс. % γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [14].

Фракционные составы порошков синтезированного образца байерита и η-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, использованных для приготовления формовочных паст, представлены на рис. 3, 4 и в табл. 2.

Рис. 4. Дифференциальная кривая распределения частиц порошка  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  по размерам.Fig. 4. Differential particle size distribution curve of  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder.Таблица 2. Фракционный состав порошков байерита и  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , использованных для приготовления формовочных пастTable 2. Fractional composition of bayerite and  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  powders used for the preparation of molding pastes

Образец Sample	Фракция, мкм Fraction, $\mu\text{m}$	Содержание, масс. % Content, wt %	Преобладающий размер*, мкм Prevailing size*, $\mu\text{m}$
Байерит Bayerite	0.2–1	30.6	0.5
	1–10	42.0	5
	10–50	27.4	19
$\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$	0.5–3	21.5	2
	3–10	30.4	5
	10–100	48.1	20

\*эквивалентный диаметр

\*equivalent diameter

По полученным результатам видно, что в процессе осаждения в заданных условиях образуется осадок байерита с размером частиц от 0.2 до 50 мкм. Причем преобладают частицы размером от 1 до 10 мкм (42 масс. %). Термообработка данного образца при 500 °С и получение  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  приводит к увеличению размера частиц до 100 мкм. При этом наблюдается уменьшение количества частиц фракции 0.5–3 мкм.

Результаты измерений функции кислотности поверхности, удельной поверхности, параметров пористой структуры, прочности гранул на раздавливание, а также суммарного объема пор гранулированных образцов носителей представлены в табл. 3.

Результаты определения интегральной характеристики кислотно-основных свойств носителей свидетельствуют об отсутствии влияния исследуемых условий их приготовления на значение функции Гаммета, равное  $H_0 = 7.1 \pm 0.1$ .

С увеличением доли порошка байерита в формовочной пасте (от образца 1 к образцу 5) наблюдается рост значений следующих текстурных характеристик гранул носителей:  $S_{\text{уд}}$  от 285 до 365 м<sup>2</sup>/г;  $V_{\Sigma}$  от 0.68 до 0.76 см<sup>3</sup>/г;  $P_{\square}$  от 0.6 до 2.0 МПа.

Такие тенденции могут быть объяснены суммарным влиянием на вторичную пористую структуру и прочность гранул следующих изменений, которые протекают при взаимной упаковке частиц

в пастах и гранулах и формировании межчастичных контактов, обеспечивающих прочность пористого тела. Во-первых, от образца 1 к образцу 5 увеличивается доля более мелких частиц, то есть возрастает число единичных контактов на единицу контактного сечения, а также доля реакционноспособных частиц (гидроксид по сравнению с оксидом), то есть повышается число контактов более высокой силы, что в совокупности способствует увеличению прочности и уменьшению размера пор. Во-вторых, рост содержания выгорающей добавки – поливинилового спирта приводит к формированию дополнительного объема вторичных пор, что влечет за собой рост суммарного объема пор  $V_{\Sigma}$  и снижение прочности.

Данные о распределении объема пор по их размерам, рассчитанные из интегральных и дифференциальных кривых, полученных из результатов азотопорометрии, приведены в табл. 4.

По приведенным в табл. 4 результатам видно, что увеличение доли байерита в формовочной пасте приводит к смещению преобладающего размера пор  $d_{\text{max}}$  в диапазоне 3–10 нм от 4.6 до 3.7 нм и некоторому увеличению их объема от 0.12 до 0.14 см<sup>3</sup>/г. Изменение этих показателей сопровождается возрастанием площади поверхности пор как в диапазоне 3–10 нм, так и «суммарной»  $S_{\text{уд}}$  образцов носителей (смотрите табл. 3 и 5). Одновременно наблюдается (табл. 4)

Таблица 3. Свойства образцов носителей  
Table 3. Properties of carrier samples

Характеристика Characteristics	Образец носителя* / Sample No.				
	1	2	3	4	5
Функция кислотности поверхности $H_0$ Surface acidity function $H_0$	7.1	7.1	7.1	7.0	7.2
Удельная поверхность $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г Specific surface $S_{sp}$ , m <sup>2</sup> /g	285	290	300	310	365
Суммарный объем пор $V_{\Sigma}$ , см <sup>3</sup> /г Total pore volume $V_{\Sigma}$ , cm <sup>3</sup> /g	0.68	0.70	0.70	0.74	0.76
Предельный объем сорбционного пространства $W_s$ , см <sup>3</sup> /г Maximum volume of sorption space $W_s$ , cm <sup>3</sup> /g	0.24	0.25	0.26	0.32	0.37
Объем макропор $V_{макро} = V_{\Sigma} - W_s$ , см <sup>3</sup> /г Macropore volume $V_{macro} = V_{\Sigma} - W_s$ , cm <sup>3</sup> /g	0.44	0.45	0.44	0.42	0.39
Прочность на раздавливание «по торцу» $P_{\square}$ , МПа Strength $P_{\square}$ , MPa	0.6	0.7	1.6	2.0	2.0
Насыпная плотность $\Delta$ , г/см <sup>3</sup> Bulk density $\Delta$ , g/cm <sup>3</sup>	0.57	0.57	0.54	0.54	0.53

\*Представленные в табл. 3 образцы отличаются составом формовочных паст: от образца 1 к 5 повышается содержание порошка гидроксида от 20 до 100 масс. % (в пересчете на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и поливинилового спирта (в зависимости от содержания порошка гидроксида) – в диапазоне от 0.0054 до 0.027 г ПВС на 1 г Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в дисперсной фазе, что соответствует содержанию ПВС в формовочной пасте от 0.4 до 1.8 масс. %.

\*The composition of the molding pastes differs for the samples presented in Table 3: from sample 1 to 5, the content of hydroxide powder increases from 20 to 100 wt % (with regards to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and the amount of polyvinyl alcohol (depending on the content of hydroxide powder) increases from 0.0054 to 0.027 g of PVA per 1 g Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, corresponding to a PVA content of 0.4 to 1.8 wt %.

некоторое увеличение преобладающих размеров и объемов пор более крупных разновидностей, а именно: мезопор в интервале 10–50 нм ( $d_{max}$  от 27.4 до 31.5 нм и  $V_{пор(10-50)}$  от 0.16 до 0.24 см<sup>3</sup>/г) и пор в интервале 50–80 нм ( $d_{max}$  от 65.2 до 77.8 нм и  $V_{пор(50-80)}$  от 0.08 до 0.16 см<sup>3</sup>/г). Это отражает изменения, прежде всего, во вторичной пористой структуре гранул и может быть обусловлено влиянием содержания выгорающей добавки – ПВС (смотрите табл. 3 и 5).

Изотермы адсорбции-десорбции азота синтезированных носителей представлены на рис. 5.

Все изотермы сорбции образцов носителей, при некотором количественном различии в величинах адсорбции, достигаемых при определенных значениях относительного давления  $P/P_0$ , (где  $P$  и  $P_0$  – равновесное давление и давление насыщенных паров адсорбата при температуре адсорбции), имеют одинаковую форму. Гистерезисы всех образцов могут быть отнесены к типу НЗ, для которого, как правило, характерны щелевидные поры с почти плоскопараллельными стенками. Адсорбционные ветви этих изотерм имеют типичную для II типа по классификации Брунауэра форму, что свидетельствует о наличии полимолекулярной адсорбции. На десорбционных же ветвях отсутствуют горизонтальные участки, а положение нижней точки петли гистерезиса, не зависящее от текстуры образца, а зависящее от природы адсорбтива, соответствует значению  $P/P_0 = 0.40$  [16]. Текстурные характеристики синтезированных носителей

приведены в табл. 5, анализ данных которой согласуется с вышесказанным.

Таким образом, исходя из наблюдений при экструдировании формовочных паст, можно сделать вывод, что применение поливинилового спирта в качестве компонента дисперсионной среды ведет к снижению степени разжижения формовочной пасты при экструдировании за счет обволакивания частиц байерита, тем самым препятствует выделению коллоидно-связанной воды и позволяет получать гранулы  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-носителя. Применение порошка оксида алюминия при приготовлении формовочных паст позволяет, в известных пределах, регулировать пористую структуру получаемых носителей.

Результаты тестирования образцов носителей в реакции низкотемпературной изомеризации *n*-бутана представлены в табл. 6. В качестве образца сравнения использован носитель на основе  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученный из порошка гидроксида алюминия байеритной структуры производства Pural BT (*Sasol*, Германия).

Из полученных результатов испытаний образцов носителей в реакции низкотемпературной изомеризации *n*-бутана видно, что независимо от соотношения применяемых байерит- и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-содержащих компонентов при получении носителей, образцы имеют достаточно высокую и сопоставимую селективность с эталонным образцом и перспективны при получении катализаторов низкотемпературной изомеризации углеводородов.

Таблица 4. Распределение объема и площади поверхности пор по размерам  
 Table 4. Size distribution of the volumes and surface areas of pores

Образец Sample No.	Характеристика Characteristic	Диапазон размера пор, нм Range of pore size, nm		
		3–10	10–50	50–80
1	$d_{\max}$ , нм $d_{\max}$ , nm	4.6	27.4	65.2
	Объем пор, см <sup>3</sup> /г Pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0.12	0.16	0.08
	Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г Surface area, m <sup>2</sup> /g	130	90	5
2	$d_{\max}$ , нм $d_{\max}$ , nm	4.4	30.5	67.2
	Объем пор, см <sup>3</sup> /г Pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0.12	0.16	0.08
	Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г Surface area, m <sup>2</sup> /g	130	95	5
3	$d_{\max}$ , нм $d_{\max}$ , nm	3.9	31.5	69.2
	Объем пор, см <sup>3</sup> /г Pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0.12	0.18	0.14
	Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г Surface area, m <sup>2</sup> /g	100	125	10
4	$d_{\max}$ , нм $d_{\max}$ , nm	3.9	31.5	71.3
	Объем пор, см <sup>3</sup> /г Pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0.13	0.21	0.15
	Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г Surface area, m <sup>2</sup> /g	110	150	10
5	$d_{\max}$ , нм $d_{\max}$ , nm	3.7	31.5	77.8
	Объем пор, см <sup>3</sup> /г Pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0.14	0.24	0.16
	Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г Surface area, m <sup>2</sup> /g	215	155	10

Таблица 5. Сводная таблица данных о пористой структуре синтезированных носителей,  
 исследованных методом азотной порометрии при 77 К на установке «Autosorb 6iSA»

Table 5. Summary data table of the porous structure of synthesized carriers  
 studied by nitrogen porosimetry at 77 K using an Autosorb 6iSA unit

Определяемый параметр Defined parameter	Образцы носителей / Sample No.				
	1	2	3	4	5
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г Specific surface, m <sup>2</sup> /g	230	240	250	275	380
Объем пор, см <sup>3</sup> /г Pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0.39	0.48	0.38	0.54	0.53

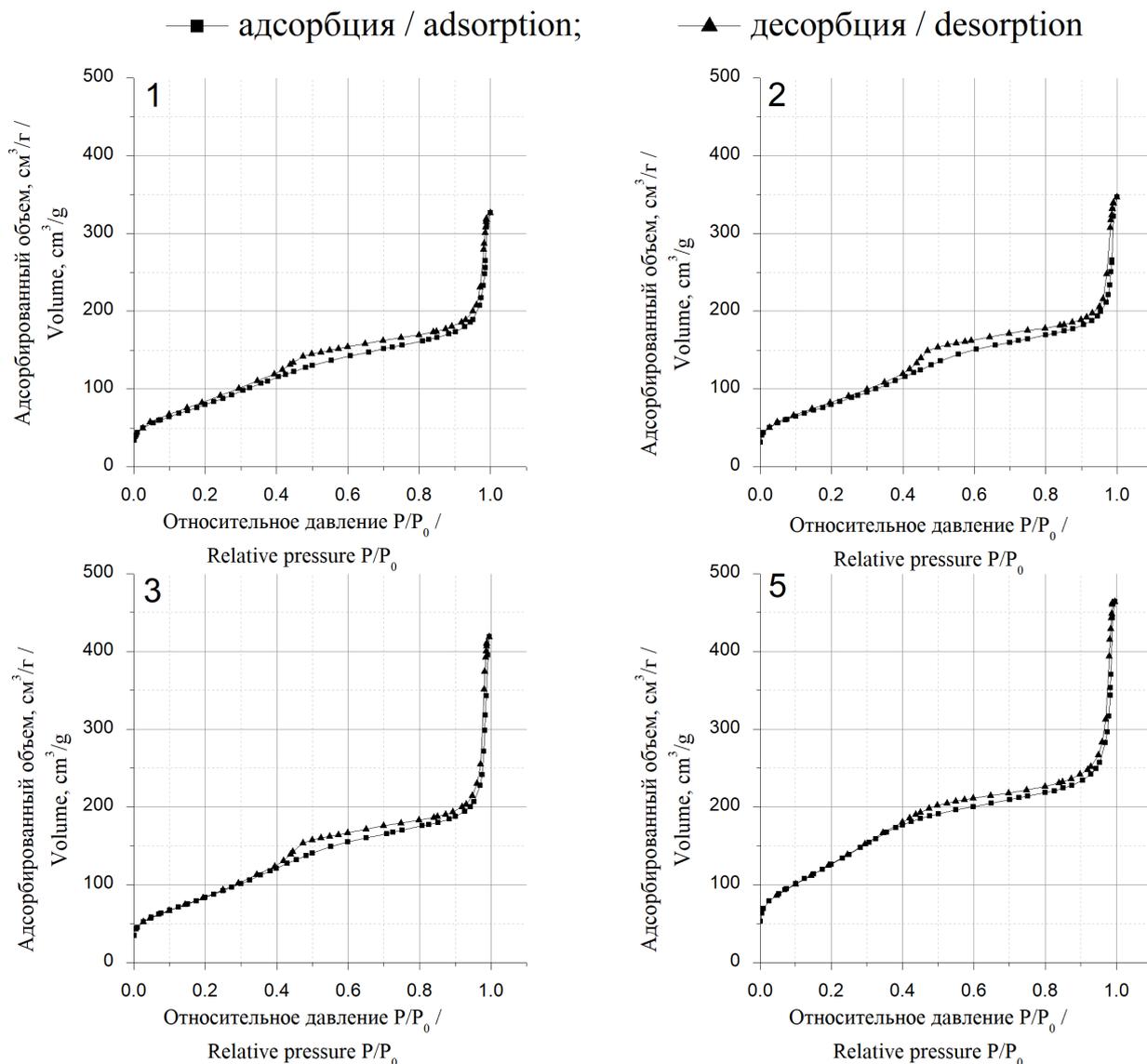


Рис. 5. Изотермы адсорбции-десорбции азота при 77 К синтезированных образцов носителей (цифрами на графиках обозначены номера исследуемых образцов).

Fig. 5. Nitrogen adsorption-desorption isotherms at 77 K for synthesized carrier samples (the numbers on the graph corresponds to the sample number).

Таблица 6. Результаты испытаний образцов носителей в реакции низкотемпературной изомеризации *n*-бутана  
**Table 6.** Test results of the carrier samples for the low-temperature isomerization reaction of *n*-butane

Показатель активности Activity indicator	Образец / Sample No.					Sasol
	1	2	3	4	5	
Глубина изомеризации <i>I</i> , % Depth of isomerization <i>I</i> , %	17.0	20.5	20.9	21.3	21.4	21.8
Конверсия <i>n</i> -бутана <i>K</i> , % Conversion of <i>n</i> -butane <i>K</i> , %	17.5	21.2	21.6	22	22.1	24.3
Селективность <i>S</i> , % Selectivity <i>S</i> , %	94.5	94.8	95.3	95.3	95.6	94.4

Увеличение доли байерита в формовочной пасте приводит к росту всех регистрируемых показателей процесса изомеризации *n*-бутана. Это может быть обусловлено как ростом удельной поверхности образцов носителей, так и увеличением объема крупных мезопор в диапазоне 20–40 нм. Таким образом, образец 5 обеспечивает наибольшие значения селективности и конверсии в проводимом процессе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние условий формования  $\eta$ -алюмооксидных носителей катализатора низкотемпературной изомеризации на их текстурные характеристики и каталитическую активность.

Определено, что в процессе осаждения байерита из раствора нитрата алюминия аммиаком в ранее обоснованных условиях [14] образуется осадок с размером частиц от 0.2 до 50 мкм, а дальнейшая термообработка образца при 500 °С приводит к увеличению размера частиц до 100 мкм.

Установлено, что применение поливинилового спирта в качестве компонента дисперсионной среды формовочных паст из порошка байерита приводит к снижению степени выделения коллоидно-связанной воды из межслоевого пространства байерита и обеспечивает возможность получения гранул  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом шнековой экструзии.

Гранулы  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-носителя, полученные экструзией паст из порошка байерита с ПВС, имеют следующие текстурные характеристики:  $S_{уд} = 365 \text{ м}^2/\text{г}$ ,  $V_{\Sigma} = 0.76 \text{ см}^3/\text{г}$ ,  $W_s = 0.37 \text{ см}^3/\text{г}$ ,  $V_{макро} = 0.39 \text{ см}^3/\text{г}$ , механическая прочность  $P_{\square} = 2.0 \text{ МПа}$ . Введение в формовочные пасты из байерита, пластфицированные ПВС, порошка  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в качестве гетерогенной добавки позволяет регулировать пористую структуру получаемых носителей. Их текстурные характеристики меняются. Повышение массовой доли порошка в смеси с байеритом до 80 масс. % приводит к уменьшению  $S_{уд}$  до 285 м<sup>2</sup>/г,  $V_{\Sigma}$  до 0.68 см<sup>3</sup>/г,  $W_s$  до 0.24 см<sup>3</sup>/г, увеличению  $V_{макро}$  до 0.44 см<sup>3</sup>/г, однако, при заметном снижении механической прочности  $P_{\square}$  до 0.6 МПа. Увеличение содержания поливинилового спирта в формовочной пасте от 0.4 до 1.8 масс. % сопровождается смещением преобладающего размера вторичных пор в большую сторону в диапазонах их значений 10–50 и 50–80 нм.

На основании проведенных испытаний носителей в модельном процессе изомеризации *n*-бутана выявлено, что полученные образцы алюмооксидного носителя, отличающиеся соотношением исходных байерит- и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-содержащих компонентов, имеют приблизительно одинаковую и достаточно высокую селективность и перспективны в качестве носителей катализаторов низкотемпературной изомеризации углеводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interest.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valavarasu G., Sairam B. Light Naphta Isomerization Process: A Review. *Petrol. Sci. Technol.* 2013;31(6):580-595. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.504931>
2. Боруцкий П.Н. Каталитические процессы получения углеводородов разветвленного строения. СПб.: НПО «Профессионал»; 2010. 724 с.
3. Ono Y. A survey of the mechanism in catalytic isomerization of alkanes. *Catal. Today.* 2003; 81(1):3-16. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(03\)00097-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(03)00097-X)
4. Smolikov M., Dzhikiya O., Zatulokina E., Kiryanov D., Belyi A. Isomerization of *n*-hexane over bifunctional Pt/SO<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub> catalysts. *Petrol. Chem.* 2009;49(473):473-480. <https://doi.org/10.1134/S096554410906005X>
5. Ясакова Е.А., Ситдикова А.В., Ахметов А.Ф. Тенденции развития процесса изомеризации в России и за рубежом. *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело.* 2010;1:1-19. URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Yasakova/Yasakova\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Yasakova/Yasakova_1.pdf)
6. Sousa B.V., Brito K.D., Alves J.J.N., Rodrigues M.G.F., Yoshioka C.M.N., Caardoso D. *n*-Hexane Isomerization on Pt/HMOR: Effect of Platinum Content. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis.* 2011;102(2):473-485. <https://doi.org/10.1007/s11144-010-0273-0>
7. Hidalgo J.M., Zbuzek M., Černý R., Jiša P. Current uses and trends in catalytic isomerization, alkylation and etherification processes to improve gasoline quality. *Cent. Eur. J. Chem.* 2014;12(1):1-13. <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0365-6>

### REFERENCES

1. Valavarasu G., Sairam B. Light Naphta Isomerization Process: A Review. *Petrol. Sci. Technol.* 2013;31(6):580-595. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.504931>
2. Borutsky P.N. Catalytic processes for the production of branched hydrocarbons. St. Petersburg: NPO Professional; 2010. 724 p. (in Russ.).
3. Ono Y. A survey of the mechanism in catalytic isomerization of alkanes. *Catal. Today.* 2003; 81(1):3-16. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(03\)00097-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(03)00097-X)
4. Smolikov M., Dzhikiya O., Zatulokina E., Kiryanov D., Belyi A. Isomerization of *n*-hexane over bifunctional Pt/SO<sub>4</sub>/ZrO<sub>2</sub> catalysts. *Petrol. Chem.* 2009;49(473):473-480. <https://doi.org/10.1134/S096554410906005X>
5. Yasakova E.A., Sitdikova A.V., Akhmetov A.F. Trends in the development of the isomerization process in Russia and abroad. *Neftgazovoe delo = Electronic scientific journal Oil and Gas Business.* 2010;1:1-19 (in Russ.). Available from: [http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Yasakova/Yasakova\\_1.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Yasakova/Yasakova_1.pdf)
6. Sousa B.V., Brito K.D., Alves J.J.N., Rodrigues M.G.F., Yoshioka C.M.N., Caardoso D. *n*-Hexane Isomerization on Pt/HMOR: Effect of Platinum Content. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis.* 2011;102(2):473-485. <https://doi.org/10.1007/s11144-010-0273-0>
7. Hidalgo J.M., Zbuzek M., Černý R., Jiša P. Current uses and trends in catalytic isomerization, alkylation and etherification processes to improve gasoline quality. *Cent. Eur. J. Chem.* 2014; 12(1):1-13. <https://doi.org/10.2478/s11532-013-0365-6>

8. Боруцкий П.Н., Подкетнова Н.М. Каталитические процессы изомеризации и дегидрирования углеводородов для производства изокомпонентов бензинов. *Катализ в промышленности*. 2003;2:86-88.
9. Иванова А.С. Оксид алюминия: применение, способы получения, структура и кислотно-основные свойства. *Промышленный катализ в лекциях*. 2009;8:7-61.
10. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Принта; 2012. 288 с. ISBN 5-93969-036-X
11. Kinyakin A.S., Glushachenkova E.A., Borutskii P.N., Shuvalov A.S., Pisarenko Yu.A. Kinetics of the low-temperature isomerization of *n*-hexane on the NIP-3A catalyst in an isothermal flow reactor. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2008;42(6):815-821. <https://doi.org/10.1134/S0040579508060031>
12. Селиверстова М.Б., Власов Е.А., Дерюжжина В.И. Исследование реологических свойств пептизированных паст гидрооксида алюминия. *Журн. Прикладной Химии*. 1981;54(1):2307-2310.
13. Ильин А.П., Прокофьев В.Ю. Физико-химическая механика в технологии катализаторов и сорбентов: Монография. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет; 2004. 315 с. ISBN 5-9616-0049-1
14. Тагандурдыева Н., Бурлуцкая Л.П. Разработка метода синтеза байеритсодержащего носителя катализатора изомеризации углеводородов. Инновационные материалы и технологии в дизайне: тезисы докладов IV Всероссийской научно-практической конференции с участием молодых ученых, 22, 23 марта 2018 г. 2018; 17-18.
15. Нечипоренко А.П., Кудряшова А.И., Кольцов С.И. Способ определения кислотности поверхности твердых веществ: SU 1377709 A1 А.с. СССР. Заявка № 4036187; заявл. 10.03.1986; опубл. 29.02.1988; Бюл. № 8.
16. Грег С., Синг К. Адсорбция. Удельная поверхность. Пористость. 2-е изд. М.: МИР; 1984. 306 с.
17. Мухленов И.П. Исследование механической прочности катализаторов. Л.: ЛТИ им. Ленсовета; 1981. 27 с.
18. Дерюжжина В. И. Методы исследования пористой структуры катализаторов. Л.: ЛТИ им. Ленсовета; 1981. 27 с.
19. Боруцкий П.Н. Сальников В.А., Никульшин П.А., Александрова Ю.В., Кузичкин Н.В. Конверсия *n*-бутана – метод тестирования твердокислотных катализаторов и их носителей для процессов нефтепереработки. СПб.: СПбГТИ(ТУ); 2017. 94 с.
20. Busca G. Structural, Surface, and Catalytic Properties of Aluminas. *Adv. Catal.* 2014;57(3):319-404. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800127-1.00003-5>
8. Borutsky P.N., Podkletnova N.M. Catalytic processes of isomerization and dehydrogenation of hydrocarbons for the production of gasoline isocomponents. *Kataliz v promyshlennosti (Catalysis in Industry)*. 2003;2:86-88 (in Russ.).
9. Ivanova A.S. Alumina: application, production methods, structure and acid-base properties. *Promyshlenniy kataliz v lektsiyakh = Industrial Catalysis in Lectures*. 2009;8:7-61 (in Russ.).
10. Chukin G.D. *Stroenie oksida alyuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya. Mekhanizmy reaktsii (The structure of alumina and hydrodesulfurization catalysts. Reaction mechanisms)*. Moscow: Printa; 2012. 288 p. ISBN 5-93969-036-X (in Russ.).
11. Kinyakin A.S., Glushachenkova E.A., Borutskii P.N., Shuvalov A.S., Pisarenko Yu.A. Kinetics of the low-temperature isomerization of *n*-hexane on the NIP-3A catalyst in an isothermal flow reactor. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2008;42(6):815-821. <https://doi.org/10.1134/S0040579508060031>
12. Seliverstova M.B., Vlasov E.A., Deryuzhkina V.I. Investigation of the rheological properties of peptized pastes of aluminum hydroxide. *Zhurnal Prikladnoi Khimii = J. Appl. Chem.* 1981;54:2307-2310 (in Russ.).
13. Il'in A.P., Prokof'ev V.Ju. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika v tekhnologii katalizatorov i sorbentov (Physical and chemical mechanics in the technology of catalysts and sorbent)*. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemistry and Technology; 2004. 315 p. ISBN 5-9616-0049-1 (in Russ.).
14. Tagandurdyeva N., Burlutskaya L.P. Development of a method for the synthesis of a bayerite-containing catalyst for the isomerization of hydrocarbons. In: *Innovative materials and technologies in design: abstracts of the IV All-Russian scientific and practical conference with the participation of young scientists, March 22, 23, 2018:17-18 (in Russ.)*.
15. Nechiporenko A.P., Kudryashova A.I., Koltsov S.I. The method for determining the surface acidity of solids: USSR Pat. 4036187. Publ. 28.02.1988 (in Russ.).
16. Greg S., Sing K. *Adsorbtsiya. Udel'naya poverkhnost'. Poristost'* (Adsorption, Specific Surface Area, Porosity). Moscow: Mir; 1984. 306 p. (in Russ.).
17. Muhlenov I.P. *Issledovanie mekhanicheskoi prochnosti katalizatorov (The study of the mechanical strength of the catalysts)*. Leningrad: LTI im. Lensoveta; 1981. 27 p. (in Russ.).
18. Deryuzhkina V.I. *Metody issledovaniya poristoi struktury katalizatorov (Methods of studying the porous structure of catalysts)*. Leningrad: LTI im. Lensoveta; 1981. 27 p. (in Russ.).
19. Borutskiy P.N. Sal'nikov V.A., Nikul'shin P.A., Aleksandrova Yu.V., Kuzichkin N.V. *Konversiya n-butana – metod testirovaniya tverdokislotnykh katalizatorov i ikh nositelei dlya protsessov neftepererabotki (Conversion of n-butane – a test method for solid acid catalysts and their carriers for oil refining processes)*. St. Petersburg: SPbGTI (TU); 2017. 94 p. (in Russ.).
20. Busca G. Structural, Surface, and Catalytic Properties of Aluminas. *Adv. Catal.* 2014;57(3):319-404. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800127-1.00003-5>

#### Об авторах:

**Тагандурдыева Нурджахан**, аспирант кафедры общей химической технологии и катализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет) (190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26). E-mail: jahana\_18101993@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7560-3605>

**Мальцева Наталья Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры общей химической технологии и катализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет) (190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26). E-mail: maltzeva.nv@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5978-5189>

**Вишневская Татьяна Алексеевна**, инженер кафедры общей химической технологии и катализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет) (190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26).

**Нараев Вячеслав Николаевич**, доктор химических наук, профессор кафедры общей химической технологии и катализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет) (190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26). E-mail: [naraev@lti-gti.ru](mailto:naraev@lti-gti.ru). <https://orcid.org/0000-0003-0276-8593>

**Постнов Аркадий Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общей химической технологии и катализа Санкт-Петербургского государственного технологического института (технический университет) (190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26). E-mail: [ap1804@yandex.ru](mailto:ap1804@yandex.ru). <https://orcid.org/0000-0003-2302-0103>

**About the authors:**

**Nurjahan Tagandurdyeva**, Postgraduate Student, Department of General Chemical Technology and Catalysis, Saint-Petersburg State Institute of Technology (26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia). E-mail: [jahana\\_18101993@mail.ru](mailto:jahana_18101993@mail.ru). <https://orcid.org/0000-0001-7560-3605>

**Natalya V. Maltseva**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of General Chemical Technology and Catalysis, Saint-Petersburg State Institute of Technology (26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia). E-mail: [maltseva.nv@yandex.ru](mailto:maltseva.nv@yandex.ru). <https://orcid.org/0000-0001-5978-5189>

**Tatyana A. Vishnevskaya**, Engineer, Department of General Chemical Technology and Catalysis, Saint-Petersburg State Institute of Technology (26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia).

**Vyacheslav N. Narayev**, Dr. of Sci. (Chemistry), Professor, Department of General Chemical Technology and Catalysis, Saint-Petersburg State Institute of Technology (26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia). E-mail: [naraev@lti-gti.ru](mailto:naraev@lti-gti.ru). <https://orcid.org/0000-0003-0276-8593>

**Arkady Yu. Postnov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of General Chemical Technology and Catalysis, Saint-Petersburg State Institute of Technology (26, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190013, Russia). E-mail: [ap1804@yandex.ru](mailto:ap1804@yandex.ru). <https://orcid.org/0000-0003-2302-0103>

*Поступила: 16.01.2020; Получена после доработки: 18.02.2020; Принята к опубликованию: 19.05.2020.  
Submitted: January 16, 2020; Reviewed: February 18, 2020; Accepted: May 19, 2020.*