

Научная статья  
УДК 628.345.1 + 54.06  
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.049

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ГИДРАТИРОВАННОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ СОЛЕЙ АЛЮМИНИЯ С ГАЗООБРАЗНЫМ АММИАКОМ

**Кирилл Андреевич Яковлев<sup>1</sup>, Дмитрий Владимирович Майоров<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева  
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>k.iakovlev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3338-1802>

<sup>2</sup>d.maiorov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7787-7455>

### Аннотация

В результате проведенных исследований установлено, что замена водной среды на органическую (ацетон), обладающую более низким значением поверхностного натяжения, позволяет получить продукт со значительно более развитыми удельной поверхностью и удельным объемом пор. Так, замена воды на ацетон позволяет практически в ~ 4 раза повысить как  $S_{уд.}$ , так и  $V_{пор.}$ .

Показано, что при первоначальном присутствии воды в порах гидратированного оксида алюминия (ГОВА) средний диаметр пор высушенного продукта составляет 3÷4 нм. Обработка синтезированного образца ацетоном приводит к увеличению среднего диаметра пор высушенного продукта до 5÷10 нм.

### Ключевые слова:

гидратированный оксид алюминия, алюмокалиевые квасцы, поверхностное натяжение жидкости, удельная поверхность, удельный объем пор

### Для цитирования:

Яковлев К. А., Майоров Д. В. Влияние поверхностного натяжения на структурно-поверхностные свойства гидратированного оксида алюминия, полученного взаимодействием солей алюминия с газообразным аммиаком // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 259–264. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.049

Original article

## THE EFFECT OF SURFACE TENSION ON THE STRUCTURAL AND SURFACE PROPERTIES OF HYDRATED ALUMINUM OXIDE OBTAINED BY THE INTERACTION OF ALUMINUM SALTS WITH AMMONIA GAS

**Kirill A. Yakovlev<sup>1</sup>, Dmitriy V. Mayorov<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

<sup>1</sup>k.iakovlev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3338-1802>

<sup>2</sup>d.maiorov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7787-7455>

### Abstract

As a result of the conducted studies, it was found that the replacement of an aqueous medium with an organic one (acetone), which has a lower value of surface tension, makes it possible to obtain a product with a significantly more developed specific surface area and specific pore volume. So, replacing water with acetone allows you to increase both Itching and Spores by almost ~ 4 times.

It was found that with the initial presence of water in the pores of GOA, the average pore diameter of the dried product is 3÷4 nm. Treatment of the synthesized sample with acetone leads to an increase in the average pore diameter of the dried product to 5÷10 nm.

### Keywords:

hydrated aluminum oxide, aluminum-potassium alum, liquid surface tension, specific surface area, specific pore volume

### For citation:

Yakovlev K. A., Mayorov D. V. The effect of surface tension on the structural and surface properties of hydrated aluminum oxide obtained by the interaction of aluminum salts with ammonia gas // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 2. P. 259–264. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.049

### Введение

Оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ) находит широкое применение во многих отраслях промышленности: для изготовления различных видов катализаторов и носителей катализаторов, адсорбентов и осушителей, наполнителей для резинотехнических и пластмассовых изделий и др. [1–4]. В каталитических процессах

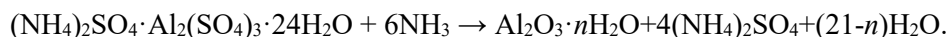
большую роль играет пористая структура катализаторов и их носителей [5], поэтому исследования, направленные на повышение их структурно-поверхностных характеристик, таких как удельные поверхность ( $S_{уд.}$ ) и объем пор ( $V_{пор.}$ ), являются актуальными.

Из литературных источников известно, что свойства различных модификаций  $Al_2O_3$  в значительной мере определяются свойствами исходных гидроксидов [6–8]. Поэтому при разработке методов получения оксидов алюминия с заданными структурно-поверхностными свойствами большое значение уделяется и получению исходных гидроксидов. Одним из методов получения гидроксидов с развитой поверхностью мезо- и макропор является их автоклавный синтез в присутствии различных добавок — полигликолей, лимонной кислоты и др. [9–11]. Другой метод — использование на стадии сушки синтезированных традиционным методом низкотемпературной золь-гель химии метода сверхкритической сушки, при которой поверхностное натяжение внутрипоровой жидкости равно нулю, что позволяет исключить деформацию образующейся первоначальной структуры каркаса геля из-за его деформации и коллапса при сушке [12]. Однако этот метод требует повышенных энергетических и материальных затрат, связанных с применением высоких температур и специального оборудования. Альтернативным способом может являться замещение перед сушкой водной внутрипоровой среды геля на органическую, например ацетон, обладающую меньшим поверхностным натяжением, что позволит минимизировать её деструктивное влияние на структуру и свойства аэрогеля.

В ИХТРЭМС КНЦ РАН разработан метод твердофазного синтеза [13], основанный на взаимодействии солей металлов, находящихся в твердом состоянии кристаллогидрата, с щелочным реагентом, в том числе с газообразным аммиаком. Целью данной работы явилось изучение влияния поверхностного натяжения внутрипоровой жидкости на структурно-поверхностные свойства гидроксидов алюминия, полученных взаимодействием солей алюминия с газообразным аммиаком.

### Экспериментальная часть и методы

В качестве источника получения гидроксида алюминия (гидратированный оксид алюминия (ГОА) ( $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ ) использовались кристаллические алюмоаммониевые квасцы  $(NH_4)_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$  (ААК) марки ч. д. а., которые легко могут быть получены из растворов сернокислотного разложения нефелинового концентрата по методу, позволяющему эффективно отделить раствор от нерастворимого остатка [14]. Обработку ААК газообразным аммиаком осуществляли пропуская его через слой соли по методике, описанной в работе [15]. При этом протекала реакция:



По завершении процесса полученный ГОА промывался водой, после чего делился на две части. Одна часть в неизменном виде сушилась при 105 °С до постоянной массы (образец 1). Другая часть подвергалась 3-кратной репульпации в ацетоне для замещения воды, находящейся в порах ГОА, на ацетон, после чего одна его часть сушилась при комнатной температуре (~ 20 °С) (образец 2), другая — при 105 °С (образец 3).

Рентгенофазовый анализ выполняли с помощью порошкового дифрактометра Shimadzu XRD-6000: запись дифрактограмм производили в диапазоне  $2\theta$  от 6 до 70 ° в режиме сканирования со скоростью 2 °/мин с шагом 0,02 °, анализ полученных дифрактограмм осуществляли с помощью базы данных PDF-4 2021.

Структурно-поверхностные характеристики диоксида кремния определяли на анализаторе удельной поверхности и пористости TriStar 3020 методами BET и BJH.

Гранулометрический анализ (ГМА) проводили на приборе Shimadzu SAID-201V.

Морфологии образцов (РЭМ) изучалась на растровом электронном микроскопе Phenom ProX при ускоряющем напряжении 5кВ<sup>1</sup>.

### Обсуждение результатов

Дифрактограммы всех полученных образцов ГОА имеют вид, типичный для рентгеноаморфных структур (не приводятся).

<sup>1</sup> Микрофотографии сделаны Ю. О. Веляевым на растровом электронном микроскопе PhenomProX при ускоряющем напряжении 5кВ. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Политехнический институт.

В таблице 1 приведены некоторые структурно-поверхностные свойства образцов. Там же приведены и значения величин поверхностного натяжения среды при температурах сушки [16, 17].

Таблица 1

Структурно-поверхностные свойства образцов ГОА

| Показатель                                                               | № образца |        |        |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|--------|
|                                                                          | 1         | 2      | 3      |
| Удельная поверхность по методу БЭТ, м <sup>2</sup> /г                    | 124,48    | 280,44 | 462,86 |
| Удельный объем пор (1,7 нм ≤ d ≤ 300 нм) (десорбция), см <sup>3</sup> /г | 0,181     | 0,787  | 0,869  |
| Средний диаметр пор по методу ВЖН (десорбция), нм                        | 3,91      | 8,48   | 5,66   |
| Поверхностное натяжение внутрипоровой среды, мН/м                        | 57,87     | 23,69  | 13,19  |

Как видно из данных табл. 1, поверхностное натяжение внутрипоровой среды (ПН<sub>вс</sub>) при сушке оказывает значительное влияние как на  $S_{уд.}$ , так и на  $V_{пор.}$  образцов ГОА.

Математическая обработка полученных результатов показала, что эти показатели находятся в прямой зависимости от величины ПН<sub>вс</sub> и с достаточной степенью точности описываются уравнениями, представленными на рис. 1 (коэффициент детерминации  $R^2 > 0,8$  [18]). Анализ этих уравнений позволяет предположить, что в условиях сверхкритической сушки (ПН<sub>вс</sub> = 0)  $S_{уд.}$  и  $V_{пор.}$  образцов ГОА составят соответственно 500÷520 м<sup>2</sup>/г и 1,0÷1,2 см<sup>3</sup>/г.

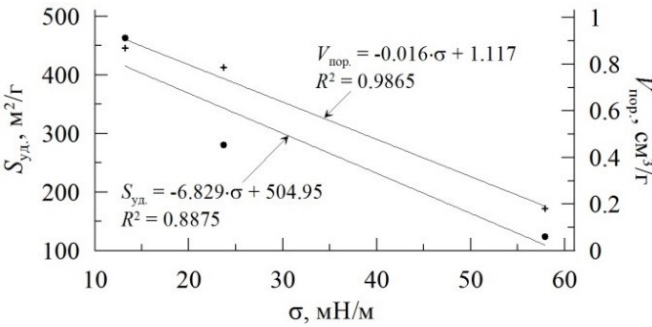
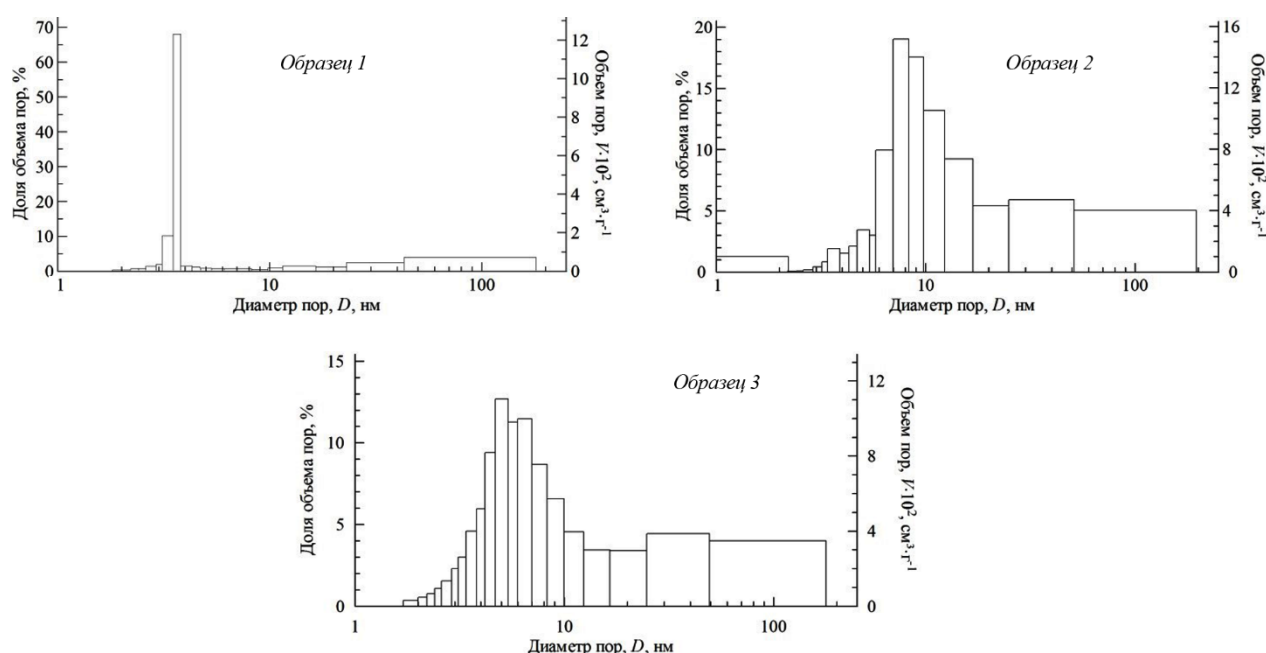


Рис. 1. Зависимости  $S_{уд.}$  и  $V_{пор.}$  образцов ГОА от ПН<sub>вс</sub> ( $\sigma$ )

На рисунках 2 и 3 приведены данные по распределению объема пор и изотермы сорбции — десорбции полученных образцов ГОА. Из данных по распределению объема пор образцов ГОА (см. рис. 2) видно, что их можно отнести, по классификации (IUPAC), к мезопористым веществам ( $2 < d_{пор} < 50$  нм): объем микропор ( $d_{пор} < 2$  нм) практически равен нулю, а объем макропор ( $d_{пор} > 50$  нм) составляет ~ 5 % (для образца № 2) и менее для образцов 1 и 3. При этом распределение мезопор для образца 1 имеет полимодальный характер с преобладанием пор, имеющих  $d_{пор} = 3 \div 4$  нм, в то время как для образцов 2 и 3 распределение близко к мономодальному с преимущественным размером пор  $5 \div 10$ , что свидетельствует о деформации и сжатии пространственной структуры ГОА в процессе сушки и хорошо согласуется с данными табл. 1.

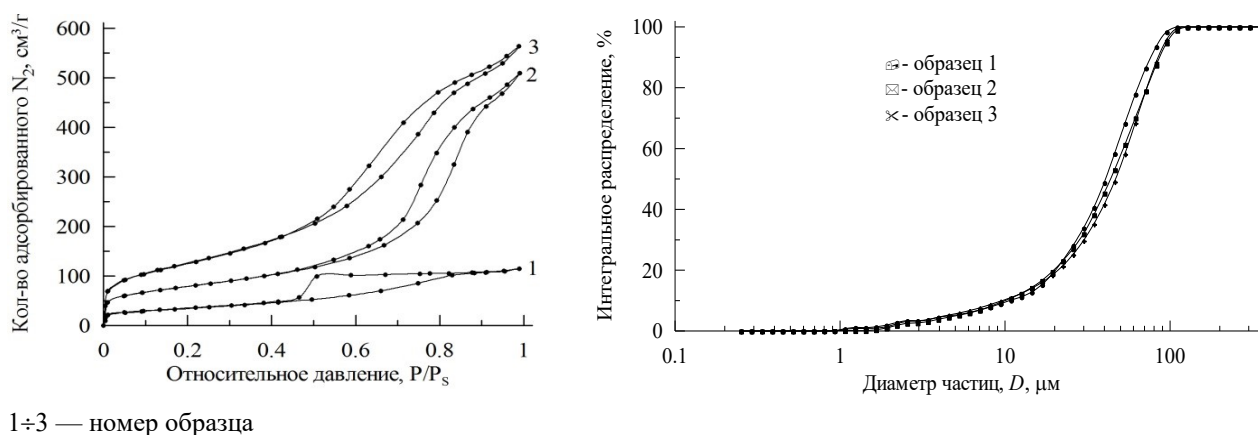
Как и следовало ожидать, вид изотерм сорбции — десорбции всех образцов ГОА (см. рис. 3) может быть отнесен, по классификации Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера (БДДТ), к изотермам IV типа [18], характерным для мезопористых веществ, отличительной особенностью которых являются петли гистерезиса на кривых сорбции — десорбции, основной причиной которых является капиллярная конденсация азота (абсорбата) в мезопорах.

Анализ петли гистерезиса для образца 1 показывает, что она соответствует, по классификации Де Бура, петле А-типа, которую он соотносит с порами цилиндрической формы. На петлях гистерезиса образцов 2 и 3 дополнительно присутствует и петля С-типа, которую Де Бур относит к клиновидным порам с открытыми концами. Характерное смыкание петли гистерезиса на изотерме в процессе десорбции ранее, чем относительное давление достигнет величины 0,3, что свидетельствует об отсутствии в образце микропор с диаметром пор менее 2 нм, что подтверждает ранее полученные результаты по распределению объема пор по их диаметру (см. рис. 2).



**Рис. 2.** Распределение объема пор по их диаметру образцов ГОА (десорбционная ветвь)

На рисунке 4 и в табл. 2 представлены результаты определения гранулометрического состава образцов ГОА. Как следует из рис. 4, все образцы имеют практически одинаковое распределение частиц по их диаметру. Однако на основании более детального рассмотрения данных табл. 2 можно сделать вывод, что уменьшение ПН<sub>вс</sub> позволяет предотвратить укрупнение частиц в процессе сушки и получить частицы с меньшим диаметром.



1÷3 — номер образца

**Рис. 3.** Изотермы сорбции — десорбции образцов ГОА

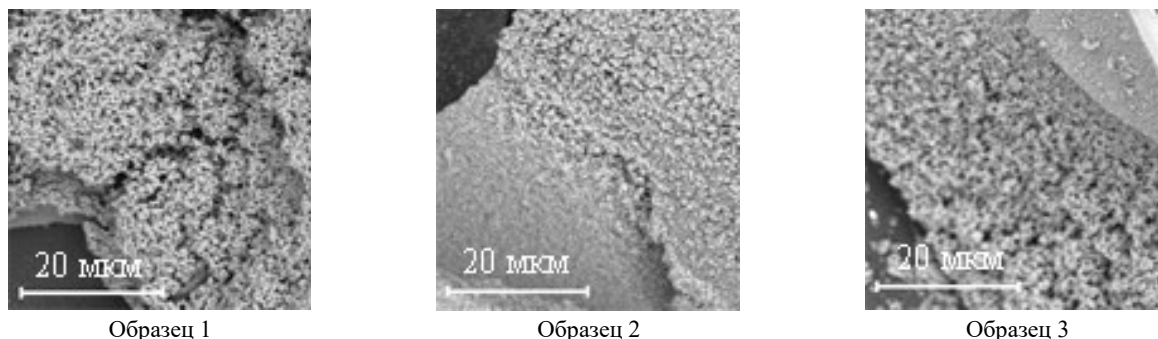
**Рис. 4.** Гранулометрический состав (интегральное распределение) образцов ГОА

Таблица 2

Распределение частиц образцов ГОА (%) по максимальному диаметру (μм)

| № образца | Количество частиц               |       |       |
|-----------|---------------------------------|-------|-------|
|           | 25 %                            | 50 %  | 75 %  |
|           | Максимальный диаметр частиц, μм |       |       |
| 1         | 23,54                           | 40,56 | 58,90 |
| 2         | 23,95                           | 43,51 | 66,65 |
| 3         | 25,65                           | 46,68 | 67,33 |

Внешний вид и морфология полученных образцов ГОА представлены на рис. 5, из которого видно, что поверхность образца ГОА 1 неоднородна, на ней присутствуют трещины, вызванные, вероятно, неравномерной усадкой в процессе сушки, в результате чего происходит разрыв более крупных пор из-за повышенного давления в них с образованием более мелких пор.



Образец 1

Образец 2

Образец 3

Рис. 5. Морфология образцов ГОА

## Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что при сушке гидроксида алюминия замена водной среды на органическую (ацетон), обладающую более низким значением поверхностного натяжения, позволяет получить продукт со значительно более развитыми удельной поверхностью и удельным объемом пор. Так, замена воды, поверхностное натяжение которой (п. н.) при температуре сушки составляет 57.87 мН/м, на ацетон (п. н. — 13.19 мН/м) позволяет практически в ~ 4 раза повысить как  $S_{уд}$ , так и  $V_{пор}$ .

Установлено, что при первоначальном присутствии воды в порах ГОА средний диаметр пор высушенного продукта составляет 3÷4 нм. Обработка синтезированного образца ацетоном приводит к увеличению среднего диаметра пор высушенного продукта до 5÷10 нм.

## Список источников

1. Стайлз Элвин Б. Носители и нанесенные катализаторы. Теория и практика / Пер. с англ. под ред. Слинкина А. А. М.: Химия, 1991. 240 с.
2. Иванова А. С. Оксид алюминия: применение, способы получения, структура и кислотно-основные свойства // Промышленный катализ в лекциях. 2009. № 8. С. 7–61.
3. Гаврилова Н. Н., Круглая Т. И., Мячина М. А., Назаров В. В., Скудин В. В. Структурированный носитель на основе  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  для мембранных катализаторов // Стекло и керамика. 2018. № 1. С. 29–35.
4. Hiaofu Hu, Yunqi Liu, Chenguang Liu. Facile Synthesis of Ammonium Aluminum Carbonate Hydroxide Multilayered Nanofiber by Using Solid State Reaction // Advanced Materials Research. 2012. Vols. 415–417. P. 580–584; doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.415-417.580
5. Загузин А. С., Романенко А. В., Бухтиярова М. В. Синтез оксидов алюминия с контролируемыми текстурными и прочностными характеристиками // ЖПХ. 2020. Т. 93, вып. 8. С. 1079–1090.
6. Чукин Г. Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. 288 с.
7. Дзисько В. А., Винникова Т. С., Кефели Л. М., Рыжак И. А. Пористая структура и прочность окиси алюминия // Кинетика и катализ. 1966. Т. VII, вып. 5. С. 859–864.
8. Трегубенко В. Ю., Удрас И. Е., Дроздов В. А., Белый А. С. Влияние пептизации псевдобемита органическими кислотами на текстурные характеристики получаемых оксидов алюминия // ЖПХ. 2011. Т. 84, № 1. С. 10–17.
9. Li Y., Peng C., Li L., Ra P. Self-assembled 3D hierarchically structured gamma alumina by hydrothermal method // J. Am. Ceram. Soc. 2014. V. 97, N 1. P. 35–39. <http://doi.org/10.1111/jace.12652>
10. Dong Y., Xu Y., Zhang Y., Lian X., Yi X., Zhou Y., Fang W. Synthesis of hierarchically structured alumina support with adjustable nanocrystalline aggregation toward efficient hydrodesulfurization // Appl. Catal. A: General. 2018. V. 559. P. 30–39.
11. Dong Y., Yu X., Zhou Y., Lian X., Yi X., Fang W. Towards active macro-mesoporous hydrotreating catalysts: Synthesis and assembly of mesoporous alumina microspheres // Catal. Sci. Technol. 2018. V. 8, No 7. P. 1892–1904.
12. Кузнецова Т. Ф., Еременко С. И. Синтез мезопористого кремнезема аэрогелевого типа // Коллоидный журнал. 2014. Т. 76, № 3. С. 356–362.
13. Пат. 2375306 РФ. Способ получения гидрата оксида металла / Матвеев В. А., Захаров В. И., Калинин В. Т., Майоров Д. В.; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34.
14. Захаров В. И., Матвеев В. А., Майоров Д. В. Изучение влияния технологических параметров кислотного разложения нефелина на фильтруемость выделяющихся кремнеземных осадков // ЖПХ. 1996. Т. 69, вып. 3. С. 365–369.
15. Матвеев В. А. Исследование твердофазного аммиачного гидролиза солей алюминия, титана и циркония // Химическая технология. 2009. Т. 10, № 8. С. 449–453.

16. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии / под общ. ред. ак. АН УССР А. Т. Пилипенко. Изд. 5-е, доп., перераб. Киев: Наукова думка, 1987. С. 612.
17. Бобылев В. Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: Справочное пособие. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003. 24 с.
18. Грег С., Синг. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: Пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. 306 с.

## References

1. Stajzl Elvin B. *Nositeli i nanesennyye katalizatory. Teoriya i praktika* [Supports and Supported Catalysts. Theory and practice]. Moscow, Khimiya, 1991, 240 p. (In Russ.).
2. Ivanova A. S. Oksid alyuminiya: primeneniye, sposoby polucheniya, struktura i kislotno-osnovnyye svoystva [Aluminum oxide: application, production methods, structure and acid-base properties]. *Promyshlennyy kataliz v lekciyakh* [Industrial catalysis in lectures], 2009, no 8, pp. 7–61. (In Russ.).
3. Gavrilova N. N., Kruglaya T. I., Myachina M. A., Nazarov V. V., Skudin V. V. Strukturirovannyj nositel' na osnove  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dlya membrannykh katalizatorov [Structured Support Based on  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for Membrane Catalysts]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2018, no 1, pp. 29–35. (In Russ.).
4. Hiaofu Hu, Yunqi Liu, Chenguang Liu. Facile Synthesis of Ammonium Aluminum Carbonate Hydroxide Multilayered Nanofiber by Using Solid State Reaction // *Advanced Materials Research*, 2012, vols. 415–417, pp. 580–584. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.415-417.580
5. Zaguzin A. S., Romanenko A. V., Buhtiyarova M. V. Sintez oksidov alyuminiya s kontroliruemyimi teksturnymi i prochnostnymi harakteristikami [Synthesis of aluminum oxides with controlled textural and strength characteristics]. *Zhurnal prikladnoy himii* [Journal of Applied Chemistry], 2020, vol. 93, Iss. 8, pp. 1079–1090. (In Russ.).
6. Chukin G. D. *Stroenie oksida alyuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya. Mekhanizmy reakcij*. [The structure of aluminum oxide and hydrodesulfurization catalysts. Reaction mechanisms]. Moscow, Tipografiya Paladin, OOO "Printa", 2010, 288 p. (In Russ.).
7. Dzisko V. A., Vinnikova T. S., Kefeli L. M., Ryzhak I. A. Poristaya struktura i prochnost' okisi alyuminiya [Porous structure and strength of aluminum oxide]. *Kinetika i kataliz* [Kinetics and catalysis], 1966, vol. VII, Iss. 5, pp. 859–864. (In Russ.).
8. Tregubenko V. Yu., Udras I. E., Drozdov V. A., Bely A. S. Vliyanie peptizatsii psevdobemita organicheskimi kislotami na teksturnyye harakteristiki poluchaemykh oksidov alyuminiya [Effect of Peptization of Pseudoboehmite with Organic Acids on the Textural Characteristics of Obtained Aluminum Oxides]. *Zhurnal prikladnoy himii* [Journal of Applied Chemistry], 2011, vol. 84, no 1, pp. 10–17. (In Russ.).
9. Li Y., Peng C., Li L., Ra P. Self-assembled 3D hierarchically structured gamma alumina by hydrothermal method. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2014, V. 97, N 1, pp. 35–39. <http://doi.org/10.1111/jace.12652>
10. Dong Y., Xu Y., Zhang Y., Lian X., Yi X., Zhou Y., Fang W. Synthesis of hierarchically structured alumina support with adjustable nanocrystalline aggregation toward efficient hydrodesulfurization. *Appl. Catal. A: General*, 2018, vol. 559, pp. 30–39.
11. Dong Y., Yu X., Zhou Y., Lian X., Yi X., Fang W. Towards active macro-mesoporous hydrotreating catalysts: Synthesis and assembly of mesoporous alumina microspheres. *Catal. Sci. Technol.*, 2018, vol. 8, no 7, pp. 1892–1904.
12. Kuznetsova T. F., Eremenko S. I. Sintez mezoporistogo kremnezema aerogel'nogo tipa [Synthesis of mesoporous aerogel-type silica]. *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 2014, vol. 76, no 3, pp. 356–362. (In Russ.).
13. Patent 2375306 RF. *Sposob polucheniya gidrata oksida metalla* [Method for producing metal oxide hydrate] / Matveev V. A., Zaharov V. I., Kalinnikov V. T., Majorov D. V.; publ. 10.12.2009, bull. no 34. (In Russ.).
14. Zakharov V. I., Matveev V. A., Maiorov D. V. Izuchenie vliyaniya tekhnologicheskikh parametrov kislotnogo razlozheniya nefelina na fil'truemost' vydelyayushchihsy kremnezemnykh osadkov [Study of the effect of technological parameters of acid decomposition of nepheline on the filterability of precipitated silica deposits]. *Zhurnal prikladnoy himii* [Journal of Applied Chemistry], 1996, vol. 69, iss. 3, pp. 365–369. (In Russ.).
15. Matveev V. A. Issledovanie tverdogaznogo ammiachnogo gidroliza soley alyuminiya, titana i cirkoniya [Study of solid-phase ammonia hydrolysis of aluminum, titanium and zirconium salts]. *Himicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology], 2009, vol. 10, no 8, pp. 449–453. (In Russ.).
16. Goronovskiy I. T., Nazarenko Yu. P., Nekryach E. F. *Kratkiy spravochnik po himii* [Quick reference guide to chemistry]. Kiev, Naukova dumka, 1987, pp. 612. (In Russ.).
17. Bobilev V. N. *Fizicheskie svoystva naibolee izvestnykh himicheskikh veshchestv* [Physical Properties of the Most Known Chemicals]. Moscow, RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2003, 24 p. (In Russ.).
18. Greg S., Sing K. *Adsorbtsiya. Udel'naya poverkhnost'. Poristost'* [Adsorption. The specific surface. The porosity]. Moscow, Mir, 1970, p. 306. (In Russ.).

## Информация об авторах

**К. А. Яковлев** — ведущий инженер;

**Д. В. Майоров** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

## Information about the authors

**K. A. Yakovlev** — lead engineer;

**D. V. Mayorov** — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 09.11.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.  
The article was submitted 09.11.2022; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.