

СИНТЕЗ АЛЮМИНАТА БАРИЯ ДИСКООБРАЗНОЙ МОРФОЛОГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДУКТА ЦЕНТРОБЕЖНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ГИББСИТА

© А. В. Жужгов¹, В. Ю. Кругляков¹, Е. А. Супрун¹, Л. А. Исупова¹

¹ Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 5
E-mail: zhuzhgov@catalysis.ru

Поступила в Редакцию 8 января 2022 г.
После доработки 18 мая 2022 г.
Принята к публикации 26 мая 2022 г.

С использованием методов рентгеновского, термического, микроскопического, адсорбционного и химического анализа изучена возможность получения алюмината бария $BaAl_2O_4$ со структурой шпинели путем гидротермальной обработки при $150^\circ C$ суспензии продукта центробежной термической активации гиббсита в водном растворе нитрата бария и последующей термообработки полученных предшественников. Показано, что термообработка продуктов гидротермального взаимодействия при $850^\circ C$ приводит к образованию однофазного алюмината бария $BaAl_2O_4$ с удельной поверхностью $\sim 50 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ в виде «дискообразных» пористых частиц, образующих агрегаты. Показано, что поверхность частиц $BaAl_2O_4$ обогащена катионами бария, достаточно равномерно распределенными по частицам. Способ позволяет сократить количество исходных реагентов, стадий приготовления, минимизировать или полностью исключить образование промывных вод.

Ключевые слова: гиббсит; продукт центробежно-термической активации гиббсита; алюминат бария
DOI: 10.31857/S0044461822040053, EDN: DGUPWG

Получению материалов на основе $BaAl_2O_4$ уделяют большое внимание благодаря таким их свойствам, как фото- и каталитическая активность, химическая инертность и термическая стабильность [1, 2]. Они являются основой для синтеза люминесцентных материалов [3, 4], используются в качестве фотокатализаторов и носителей фотокатализаторов, например, в процессах окисления толуола, бензола [1, 2], а также очистки воды [5], как катализаторы перэтерификации отработанного растительного масла до биодизеля [6].

Наиболее распространенным методом получения алюмината бария со структурой шпинели состава $BaAl_2O_4$ (где $Ba^{2+} \sim 54 \text{ мас}\%$) является твердофазный синтез с использованием в качестве исходных

веществ оксидов, гидроксидов или неорганических солей металлов [7–10]. Недостатки данного способа получения заключаются в необходимости использования высоких температур $1400\text{--}1600^\circ C$, а также в получении многофазных и часто нестехиометрических продуктов с низкой удельной поверхностью. Для увеличения фазовой однородности продукта и его удельной поверхности широко используют методы синтеза из жидкой фазы, такие как горение растворов органо-нитратных предшественников, различные разновидности золь-гель технологии [1–4], что позволяет снизить температуру синтеза и соответственно уменьшить размер кристаллитов целевого продукта.

В работе [11] нами продемонстрирована возможность использования продукта центробежной термической активации гиббсита для получения алюмомагнезиевой шпинели $MgAl_2O_4$ путем выдерживания его в растворе $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ в гидротермальных условиях с последующими сушкой и термообработкой при $550^\circ C$. По сравнению с традиционным керамическим методом синтеза способ обеспечивает снижение температуры прокаливания и получение высокодисперсного продукта, а по сравнению с методом осаждения позволяет сократить количество исходных реагентов, стадий приготовления, минимизировать или полностью исключить стоки, а также сократить количество исходных нитратов на 75% по сравнению с классической схемой соосаждения, использующей соли $Ba(NO_3)_2$ и $Al(NO_3)_3$. Это делает данный способ весьма привлекательным для получения сложных дисперсных алюминатов для различных приложений, в том числе для получения термостабильных носителей и катализаторов, характеризующихся пониженной кислотностью поверхности [12, 13].

Цель работы — изучение возможности и условий получения $BaAl_2O_4$ со структурой шпинели с развитой удельной поверхностью путем мягкой гидрохимической обработки суспензии продукта центробежной термической активации гиббсита в растворе $Ba(NO_3)_2$ и последующей термообработки образующегося продукта.

Экспериментальная часть

В качестве исходного сырья для получения продукта центробежной термической активации гиббсита марки ИК-02-76 использовали гиббсит производства ОАО «Ачинский глиноземный комбинат» марки ГД 000. Содержание примесей в исходном гиббсите (мас%): Fe — 0.002, Na — 0.11, K — 0.033 и Si — 0.014. Величина удельной площади поверхности исходного порошка составляла не более $1 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$. Потери при прокаливании при $850^\circ C$ составили 34 мас%. В качестве исходного Ba-содержащего соединения использовали безводную соль $Ba(NO_3)_2$ (ч.д.а., ООО «НПО РЕАГЕНТ»).

Термоактивацию гиббсита проводили в центробежном флэш-реакторе барабанного типа (ЦЕФЛАР®) [14] при температуре теплоэлектронагревателей $580 \pm 5^\circ C$, скорости вращения барабана $60 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$ и расходе исходного порошка $50 \text{ кг} \cdot \text{ч}^{-1}$. Потери при прокаливании полученного продукта термоактивации при $850^\circ C$ составили 3.3 мас%. После проведения термоактивации порошок подвергали помолу в шаровой мельнице в течение 6 ч, что обе-

спечивало получение порошка со средним размером частиц около 50 мкм. Далее по тексту продукт центробежной термической активации гиббсита обозначен как ЦТА-ГБ.

Для получения образцов в предварительно подготовленный раствор $Ba(NO_3)_2$ добавляли продукт центробежной термической активации гиббсита, так чтобы, как было указано выше, соотношение катионов соответствовало стехиометрическому $BaAl_2O_4$, в котором $Ba^{2+} \sim 54 \text{ мас}\%$. Полученную суспензию с исходным значением pH около 5.0 подвергали гидротермальной обработке при $150^\circ C$ в течение 4 ч при перемешивании со скоростью $120 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$. Гель, образовавшийся в результате гидротермальной обработки суспензии, сушили при $110^\circ C$ в течение 6 ч до состояния ксерогеля, последующую термообработку которого проводили в муфельной печи на воздухе при температурах 550 и $850^\circ C$ в течение 4 ч. Далее по тексту образцы обозначены как Ba-Al-T, где T — конечная температура ($^\circ C$) обработки.

Рентгенофазовый анализ проводили с помощью дифрактометра D-500 (Siemens) с использованием $Cu_{K\alpha}$ -излучения и графитового монохроматора на отраженном пучке. Образцы сканировали с шагом 0.05° в области значений углов $2\theta = 10\text{--}70^\circ$ и временем накопления 3 с. Идентификацию фаз осуществляли путем сравнения экспериментальных дифрактограмм с дифрактограммами баз данных ICDD и PDF 2.

Термический анализ образцов выполняли на синхронном термоанализаторе STA 449 C Jupiter (Netzsch) в интервале температур $20\text{--}850^\circ C$ со скоростью нагрева $10 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$ с использованием навесок 30 мг.

Морфологию образцов исследовали на микроскопе Regulus SU8230 (Hitachi) при энергии электронов зонда 2 кэВ в режиме отраженных электронов LA-BSE (обратно-рассеянные электроны под малым углом), что позволяет получать смешанную информацию композиционного (фазового) и топографического контрастов с глубины слоя до 5 мкм. Химический анализ приповерхностного слоя выполнен с использованием прибора Tescan Solaris S900 при энергии электронов зонда 20 кэВ. Микроскопы укомплектованы рентгеновскими энергодисперсионными спектрометрами ULTIM MAX 100 (Oxford Instruments) с системой анализа Aztec, которая обеспечивает выполнение качественного и количественного анализа.

Текстурные характеристики получены методом низкотемпературной десорбции азота при 77 К на автоматизированном приборе Quadrasorb-EVO (Quantachrome Instruments). Образцы исследовали в

виде порошков с предварительным их вакуумированием при 300°C в течение 2 ч. Методики измерения и расчета текстурных параметров соответствовали стандартам ASTM D3663, ASTM D4820, ASTM D1993, UOP425-86.

Общее содержание бария определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на приборе OPTIMA 4300 DV (Perkin Elmer).

Обсуждение результатов

По данным рентгенофазового анализа исходный ЦТА-ГБ представляет собой практически полностью рентгеноаморфный (или χ - Al_2O_3 -подобный) продукт со следами бемита, сформированного на стадии термоактивации (рис. 1, *a*). На дифрактограмме образца ЦТА-ГБ наблюдается широкий размытый фон во всей области значений дифракционных углов с малоинтенсивными узкими пиками, относящимися к бемиту, и малоинтенсивным уширенным пиком в области углов $2\theta = \sim 66^\circ$, соответствующим χ - Al_2O_3 и перекрывающим рефлекс от примеси фазы бемита [15–17]. На дифрактограмме полученного продукта гидротермальной обработки после низкотемпературной сушки при 110°C (Ва-А1-110) обнаружено присутствие рефлексов только от исходной безводной соли $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (рис. 1, *б*, кривая 1). После термообработки при 550°C в образце Ва-А1-550 фиксируются слабые пики от следовых количеств не полностью разложившегося $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и плохоокристаллизованной фазы «протошпинели» BaAl_2O_4 (рис. 1, *б*, кривая 2). Увеличение температуры термообработки до 850°C (образец Ва-А1-850) приводит к образованию

практически однофазного BaAl_2O_4 со структурой шпинели (рис. 1, *б*, кривая 3).

На кривых нагрева исходного ЦТА-ГБ (рис. 2, *a*) наблюдаются три тепловых эндотермических эффекта: эффект при 103°C обусловлен удалением слабосвязанной/адсорбированной воды; эндоэффекты при 512 и 582°C могут быть обусловлены дегидратацией бемита, присутствие которого отмечено по данным РФА (рис. 1, *a*); экзотермический тепловой эффект с максимумом при 805°C свидетельствует о кристаллизации рентгеноаморфной фазы в низкотемпературные формы Al_2O_3 [15, 16]. Термограмма продукта гидротермальной обработки Ва-А1-110 (рис. 2, *б*), высушенного до постоянной массы при 110°C в течение 6 ч, существенно отличается от исходной термограммы продукта центробежной термической активации гиббсита (рис. 2, *a*). Эти различия обусловлены увеличением потерь массы от 3.3 до 36%, а также появлением новых тепловых эффектов. По данным термического анализа образца Ва-А1-110 детектируются низкотемпературные эндотермические эффекты с максимумами при 127–140 и 246°C, отвечающие за удаление слабосвязанной молекулярной воды и ОН-групп соответственно. Появление эндотермических тепловых эффектов при 380–400°C может быть обусловлено дегидратацией γ - AlOOH со структурой псевдобемита, образование которого наблюдается при обработке продуктов термоактивации гиббсита в кислой и слабокислой водной среде [19, 20]. Образование псевдобемита в продукте взаимодействия подтверждается сравнением потерь массы исходного продукта термоактивации (~1%) и высушенного при 110°C продукта гидратации (~5%), что свидетельствует об увеличении содержания бемита/

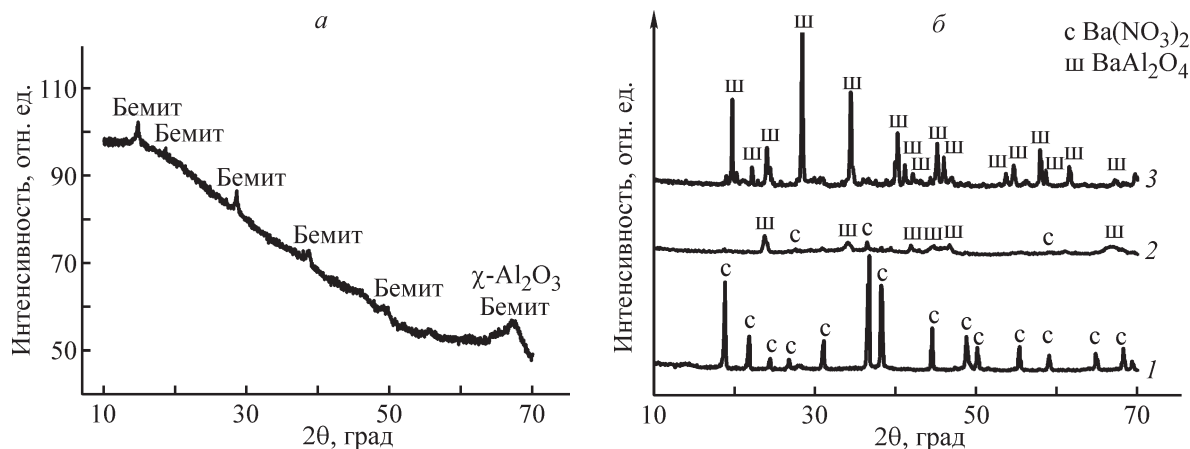


Рис. 1. Данные рентгенофазового анализа продукта центробежной термоактивации гиббсита (*a*); продуктов гидротермальной обработки гиббсита в присутствии раствора $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ после термообработки при 110 (Ва-А1-110) (1), 55°C (Ва-А1-550) (2), 850°C (Ва-А1-850) (3) (*б*).

псевдобемита с ~ 5.4 в исходном продукте термоактивации до $\sim 33.4\%$ в продукте гидратации, если выполнить расчет по уравнению $2\text{AlOOH} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Именно поэтому, несмотря на отсутствие, по данным РФА, пиков псевдобемита (по-видимому, из-за малого размера кристаллитов), мы предполагаем его образование на основании данных термического анализа, что не противоречит литературным данным [16, 17]. Можно предположить, что меньшая степень окристаллизованности образовавшегося псевдобемита по сравнению, например, с данными [16] обусловлена присутствием соли $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ во время гидратации, что и оказывает влияние на скорость кристаллизации кристаллитов бемита (псевдобемита). Аналогичные закономерности были отмечены для осадков в теории кристаллизации малорастворимых гидроксидов по механизму ориентированного наращивания [18].

Известно, что неполное терморазложение $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ протекает при температурах $590\text{--}600^\circ\text{C}$ с образованием кислорода и нитрита бария $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2$, а полное разложение до BaO и оксидов азота осуществляется выше 670°C [19]. В связи с этим наличие эндотермических эффектов в области $600\text{--}690^\circ\text{C}$, сопровождаемых максимальной потерей массы, связано с полным разложением исходного нитрата бария и протеканием реакции синтеза между образовавшейся низкотемпературной формой оксида алюминия, скорее всего гамма-модификации, и образующимся оксидом бария с формированием BaAl_2O_4 (рис. 1, б, кривая 3).

Таким образом, из совокупности данных рентгенофазового и термического анализов можно сделать заключение о том, что высушенный при 110°C продукт взаимодействия термоактивированного гиббсита с водным раствором $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, взятыми при мольном

соотношении $\text{Ba}^{2+}:\text{Al}^{3+} = 1:2$, представляет собой смесь исходной соли $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и продукта гидратации ЦТА-ГБ — высокодисперсного псевдобемита. В результате термической обработки высушенного продукта при 550°C происходят процессы частичного взаимодействия и терморазложения этих двух составляющих, и образовавшийся Ba-Al-550 состоит из не полностью разложившегося $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и плохоокристаллизованной Ba-Al шпинели (по данным рентгенофазового анализа). Термообработка высушенного продукта при 850°C обеспечивает более полное взаимодействие исходных компонентов с формированием однофазного BaAl_2O_4 согласно данным рентгенофазового анализа (рис. 1, б, кривая 3).

В образце Ba-Al-850 обнаруживаются частицы размером около 25 мкм (рис. 3, а). На снимках с более высоким увеличением видно, что эти крупные частицы состоят из пористых дискообразных частиц алюмината бария толщиной $150\text{--}180\text{ нм}$ и диаметром $800\text{--}1200\text{ нм}$ с размером пор $10\text{--}50\text{ нм}$ (рис. 3, б, в).

По результатам исследования химического состава установлено, что в образце Ba-Al-850 (рис. 3, з) поверхность обогащена Ba^{2+} , который практически равномерно распределен по всем частицам. Согласно данным химического анализа, выполненного методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой, содержание бария в продукте соответствует расчетному на стадии синтеза ($54\text{ мас}\%$).

Важно отметить, что морфология поверхности частиц BaAl_2O_4 , полученных в настоящей работе путем взаимодействия продукта центробежной термической активации гиббсита с водным раствором $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ в относительно «мягких» гидротермальных условиях с последующей сушкой и термообработкой при 850°C , отличается от приготовленных другими методами.

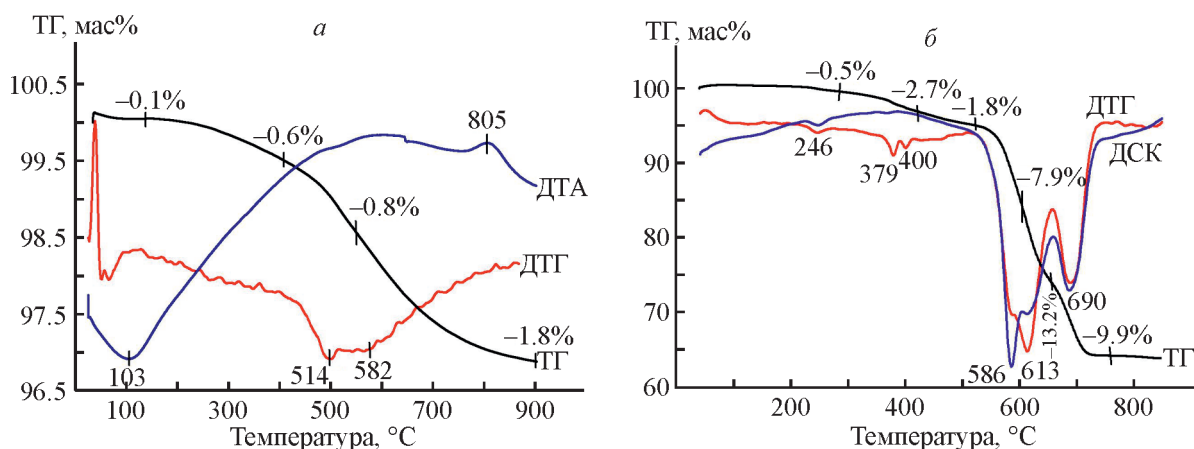


Рис. 2. Термограммы продукта центробежной-термической активации гиббсита (а); продукта гидротермальной обработки гиббсита в растворе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ после сушки при 110°C (образец Ba-Al-110) (б).

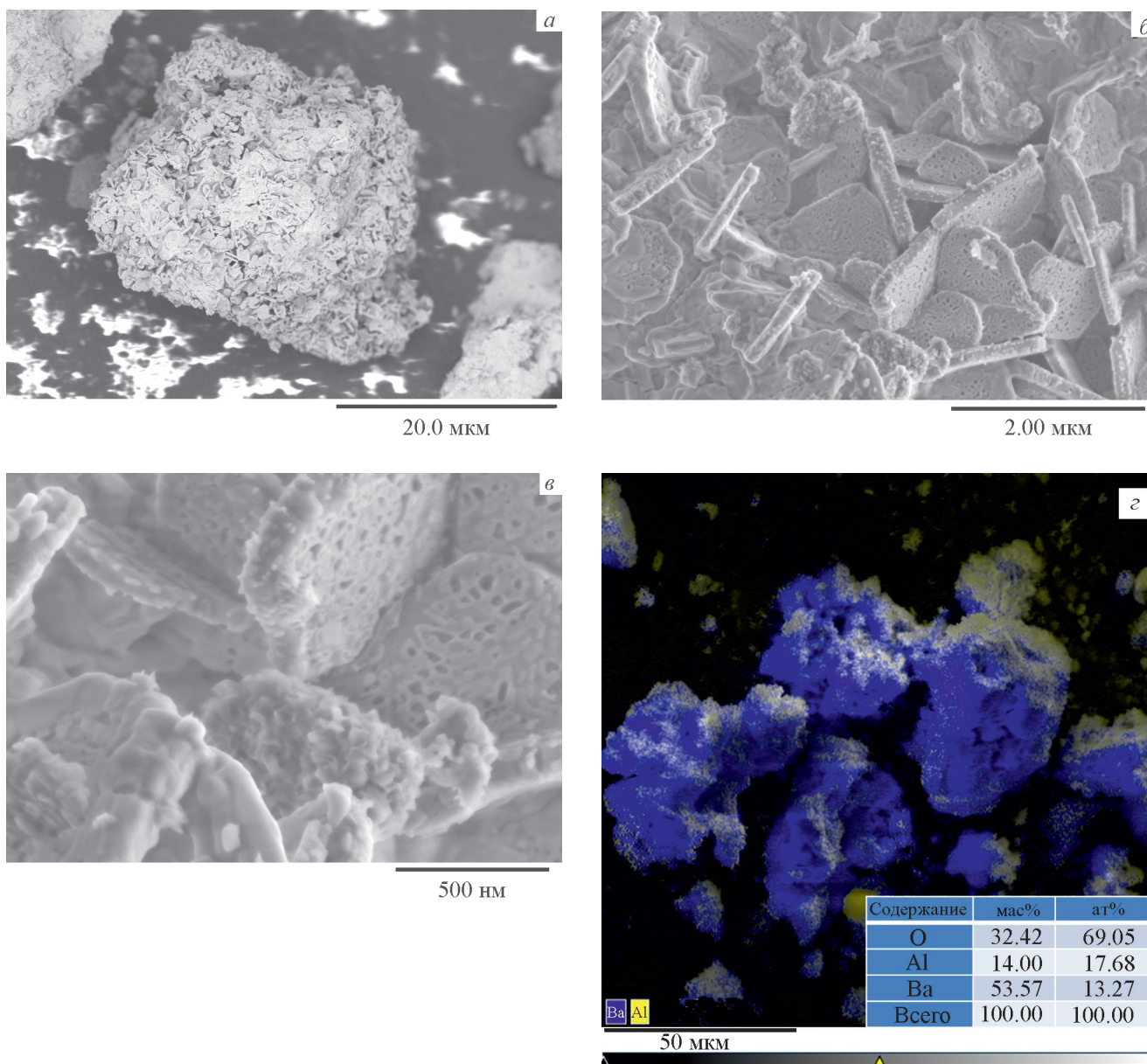


Рис. 3. Морфология частиц продукта гидротермальной обработки после термообработки при 850°C (образец Ва-Аl-850) (а–в) и химический анализ поверхностного слоя (г).

Например [4], $BaAl_2O_4$, полученный соосаждением Ba^{2+} и Al^{3+} из смешанных водных растворов нитратов этих металлов с применением NH_4OH в качестве осадителя, после термообработки при 750°C состоит из частиц диаметром 1–1.5 мкм в форме «цветков», имеющих ярко выраженные лепестки, длина которых 400–600 нм и толщина 100–150 нм. В работе [1] $BaAl_2O_4$ готовили гидротермальной обработкой солей $Ba(NO_3)_2 \cdot 5H_2O$ и $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (с добавлением осадителя — NH_4OH) при 200°C в течение 20 ч с последующей сушкой и термообработкой при 750°C и временем выдержки 5 ч. Полученный таким образом $BaAl_2O_4$ состоит из агломерированных ча-

стиц в форме наностержней со средними размерами 40–50 нм.

После термообработки как при 550, так и 850°C образцы Ва-Аl-550 и Ва-Аl-850 характеризуются широким распределением пор по размерам от 3 до 200 нм (рис. 4). Увеличение температуры синтеза от 550 до 850°C приводит к двукратному снижению удельной поверхности (до $\sim 50 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$), а также увеличению среднего диаметра пор (до $\sim 10 \text{ нм}$), при этом суммарный объем пор, а также диапазон распределения пор по размерам остаются постоянными (см. таблицу). Полученный ранее [8] по традиционной золь-схеме через стадии протекания реакций гидро-

Состав и текстурные характеристики образцов алюминатов бария после гидротермальной обработки и термообработки

Образец	Качественный состав образцов	Величина удельной площади поверхности, $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$	Величина общего объема пор, $\text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$	Диаметр пор, нм
Va-Al-110	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, псевдобемит	Не измеряли	Не измеряли	Не измеряли
Va-Al-550	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, BaAl_2O_4	88/126	0.28	4.0
Va-Al-850	BaAl_2O_4	50/67	0.27	10.1
Va-Al-750 золь-гель [4]	BaAl_2O_4	22/—	—	2.0
Va-Al-750 гидротермальная обработка солей [1]	BaAl_2O_4	142/—	—	9.7

Пр и м е ч а н и е. «—» — в литературном источнике данные не приведены.

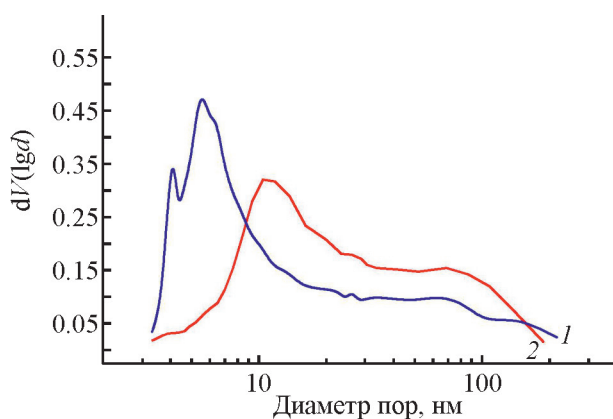


Рис. 4. Десорбционные кривые распределения пор по размерам.

1 – Va-Al-550, 2 — Va-Al-850.

лиза в смешанных водных растворах солей кристаллогидратов нитридов бария и алюминия и прокаленный при 750°C в течение 4 ч катализатор BaAl_2O_4 характеризуется более узким распределением пор по размерам от 1.22 до 14 нм со средним размером пор около 2.0 нм. Удельная поверхность образца после термообработки при более низкой температуре составила $22 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ [8]. Как было отмечено [1], гидротермальная обработка смешанных растворов солей $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ при 200°C в течение 20 ч с последующим прокаливанием при $750^\circ\text{C}/5$ ч приводит к формированию наностержней BaAl_2O_4 с удельной поверхностью $142 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ с порами 2–30 нм (средний диаметр пор 9.7 нм). Полученный в [2] золь-гель методом BaAl_2O_4 с содержанием TiO_2 1–5 мас% характеризовался удельной поверхностью $6\text{--}15 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Таким образом, приготовленный с использованием продукта центробежной термической активации BaAl_2O_4 после термообработки при 850°C харак-

теризуется высокой удельной поверхностью благодаря развитой пористой структуре образующихся пористых дискообразных частиц микрометровых размеров.

Выводы

В работе исследована возможность получения дисперсного BaAl_2O_4 путем гидротермальной обработки продукта центробежной термической активации гиббсита в растворе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ при стехиометрическом соотношении катионов Ba^{2+} и Al^{3+} . Показано, что в результате термообработки продукта гидротермальной обработки при 850°C в течение 4 ч формируется однофазный BaAl_2O_4 с удельной поверхностью $\sim 50 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$. Особенностью синтезированного в настоящей работе BaAl_2O_4 по сравнению с получаемым золь-гель методом, в том числе соосаждением, является дискообразная форма образующихся пористых частиц, а также широкий диапазон распределения пор по размерам 3–200 нм. Предлагаемый способ позволяет сократить количество исходных реагентов, стадий приготовления, минимизировать или полностью исключить стоки.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, проект АААА-А17-117041710090-3.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

А. В. Жужгов и В. Ю. Кругляков разработали методику эксперимента, участвовали в приготовлении образцов, анализе полученных результатов и подготовке текста статьи; Е. А. Супрун выполнил электронно-микроскопическое исследование образцов; Л. А. Исупова внесла существенный вклад в замысел и дизайн исследования, интерпретацию полученных данных и подготовку окончательного варианта статьи для публикации.

Информация об авторах

Жужгов Алексей Викторович, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3085-2867>

Кругляков Василий Юрьевич, к.т.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6880-2152>

Супрун Евгений Александрович, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1599-2888>

Исупова Любовь Александровна, д.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6221-1060>

Список литературы

- [1] Zhu Z., Liu F., Zhang W. Fabricate and characterization of Ag/BaAl₂O₄ and its photocatalytic performance towards oxidation of gaseous toluene studied by FTIR spectroscopy // *Mat. Res. Bull.* 2015. V. 64. P. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.12.026>
- [2] Li S., Wang W., Chen Y., Zhang L., Guo J., Gong M. Fabrication and characterization of TiO₂/BaAl₂O₄:Eu²⁺, Dy³⁺ and its photocatalytic performance towards oxidation of gaseous benzene // *Cat. Commun.* 2009. V. 10. P. 1048–1051. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2008.12.064>
- [3] Wako A. H., Dejene F. B., Swart H. C. Combustion synthesis, characterization and luminescence properties of barium aluminate phosphor // *J. Rare Earths.* 2014. V. 32. P. 806–811. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60145-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60145-9)
- [4] Maphiri V. M., Mhlongo M. R., Hlatshwayo T. T., Motaung T. E., Koao L. F., Motloung S. V. Citrate sol-gel synthesis of BaAl₂O₄:x% Cu²⁺ (0 ≤ x ≤ 1) nano-phosphors: Structural, morphological and photoluminescence properties // *Opt. Mat.* 2020. V. 109. P. 110244. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110244>
- [5] Kim D. H., Chin Y. H., Kwak J. H., Szanyi J., Peden Ch. H. F. Changes in phases in BaO/Al₂O₃ upon thermal aging and H₂O treatment // *Catal. Lett.* 2005. V. 105. P. 259–268. <https://doi.org/10.1007/s10562-005-8700-y>
- [6] Yadan M., Sharma Y. C. Transesterification of used vegetable oil using BaAl₂O₄ spinel as heterogeneous base catalyst // *Energy Conv. Manag.* 2019. V. 198. P. 111795. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111795>
- [7] Mohapatra A., Pattanaik D. P., Anand S., Das R. P. Effect of barium to aluminium ratio on phases leading to barium aluminates // *Ceram. Int.* 2007. V. 33. P. 531–535. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.10.019>
- [8] Rodehorst U., Carpenter M. A., Marion S., Henderson C. M. B. Structural phase transitions and mixing behaviour of the Ba-aluminate (BaAl₂O₄)-Sr-aluminate (SrAl₂O₄) solid solution // *Min. Mag.* 2003. V. 67. P. 989–1013. <http://dx.doi.org/10.1180/0026461036750139>
- [9] Chen G. H., Niu D. Mechanical activation of barium aluminate formation from BaCO₃-Al₂O₃ mixtures // *J. Alloys Compd.* 2006. V. 413. P. 319–322. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.07.001>
- [10] Abakumov A. M., Lebedev O. I., Nistor L., Tendeloo G. V., Amelinckx S. The ferroelectric phase transition in tridymite type BaAl₂O₄ studied by electron microscopy // *Phase. Trans.* 2000. V. 71. P. 143–160. <https://doi.org/10.1080/01411590008224545>
- [11] Жужгов А. В., Кругляков В. Ю., Супрун Е. А., Проценко П. С., Исупова Л. А. Синтез высокодисперсных алюмомагниевого оксидов на основе продукта центробежной термической активации гиббсита // *ЖПХ.* 2021. Т. 94. № 2. С. 163–173. <https://doi.org/10.31857/S0044461821020043>
[Zhuzhgov A. V., Kruglykov V. Yu., Suprun E. A., Protsenko R. S., Isupova L. A. Synthesis of highly dispersed aluminum magnesium oxides from the product of centrifugal thermal activation of gibbsite // *Russ. J. Appl. Chem.* 2021. V. 94. N 2. P. 152–161. <https://doi.org/10.1134/S107042722102004X>].
- [12] Боканegra С. А., Гуэото-Пуи А., Селза О. А., де Мигуэль С. Р. Шпинель MgAl₂O₄, приготовленная методом механохимического синтеза, как носитель полиметаллических катализаторов дегидрирования парафинов // *Катализ в пром-сти.* 2012. № 5. С. 63–74 [Bocanegra S. A., Guerrero-Ruiz A., Scelza O. A., de Miguel C. P. MgAl₂O₄ spinel prepared by mechanochemical synthesis used as a support of multimetallic catalysts for paraffin dehydrogenation // *Catal. Industry.* 2013. N 5. P. 61–73. <https://doi.org/10.1134/S2070050413010030>].
- [13] Бельская О. Б., Степанова Л. Н., Гуляева Т. И., Голинский Д. В., Белый А. С., Лихолобов В. А. Исследование катализаторов Pt/MgAlO_x в реакции дегидрирования n-декана // *Кинетика и катализ.* 2015. Т. 56. № 5. С. 663–671. <https://doi.org/10.7868/S0453881115050019>
[Belskaya O. B., Stepanova L. N., Gulyaeva T. I., Golinskii D. V., Belyi A. S., Likholobov V. A. Study of Pt/MgAlO_x catalysts in n-decane dehydrogenation // *Kinet. Catal.* 2015. V. 56. N 5. P. 655–662. <https://doi.org/10.1134/S0023158415050018>].

- [14] Пат. РФ 2264589 (опубл. 2005). Способ и устройство для импульсной тепловой обработки сыпучих материалов.
- [15] *Танашев Ю. Ю., Мороз Э. М., Исупова Л. А., Иванова А. С., Литвак Г. С., Амосов Ю. И., Рудина Н. А., Шмаков А. Н., Степанов А. Г., Харина И. В., Кулько Е. В., Данилевич В. В., Балашев В. А., Кругляков В. Ю., Золотарский И. А., Пармон В. Н.* Получение оксидов алюминия на основе продуктов быстрого терморазложения гидраргиллита в центробежном флэш-реакторе. Физико-химические свойства продуктов центробежной термоактивации гидраргиллита // *Кинетика и катализ*. 2007. Т. 48. № 1. С. 161–170 [*Tanashev Yu. Yu., Moroz E. M., Isupova L. A., Ivanova A. S., Litvak G. S., Amosov Yu. I., Rudina N. A., Shmakov A. N., Stepanov A. G., Kharina I. V., Kul'ko E. V., Danilevich V. V., Balashov V. A., Kruglyakov V. Yu., Zolotarskii I. A., Parmon V. N.* Synthesis of aluminum oxides from the products of the rapid thermal decomposition of hydrargillite in a centrifugal flash reactor. Physicochemical properties of the products obtained by the centrifugal thermal activation of hydrargillite // *Kinet. Catal.* 2007. V. 48. N 1. P. 153–161. <https://doi.org/10.1134/S002315840701020X>].
- [16] *Danilevich V. V., Klimov O. V., Nadeina K. A., Gerasimov E. Yu., Cherepanova S. V., Vatutina Yu. V., Noskov A. S.* Novel eco-friendly method for preparation of mesoporous alumina from the product of rapid thermal treatment of gibbsite // *Superlat. Microstruct.* 2018. V. 120. P. 148–160. <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2021-6-368-381>
- [17] *Danilevich V. V., Isupova L. A., Parmon V. N.* The process for preparation of active aluminum hydroxyoxide via flash calcination of gibbsite in a new energy-efficient centrifugal drum-type reactor // *Clean. Eng. Techn.* 2021. V. 3. P. 100118. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100118>
- [18] *Буянов Р. А., Криворучко О. П.* Разработка теории кристаллизации малорастворимых гидроокисей металлов и научных основ приготовления катализаторов из веществ этого класса // *Кинетика и катализ*. 1976. Т. 17. № 3. С. 765–775.
- [19] *Ansaree Md. J., Upadhyay S.* Thermal analysis of formation of nano-crystalline BaTiO₃ using // *Proc. Appl. Ceram.* 2015. V. 9. P. 181–185. <https://doi.org/10.2298/PAC1504181A>
-