

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ
INORGANIC CHEMISTRYУДК 546.26:544.723.2:661.183.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-183-192>Поступила в редакцию 25.07.2025
Received 25.07.2025**Л. С. Ещенко¹, А. И. Сумич², А. В. Алексеева¹**¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь²Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПСЕВДОБЕМИТА
В СИСТЕМЕ $Al_x(An)_3-NH_4OH-H_2O$**

Аннотация. Гидратированный оксид алюминия широко используется в различных сферах деятельности – от производства катализаторов до медицины. Известны различные модификации гидратированного оксида алюминия – гиббсит, байерит, нордстрандит, псевдобемит, бемит. Определенный интерес представляет способ получения $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ со структурой псевдобемита, который относится к высокодисперсному гидроксиду алюминия с развитой удельной поверхностью. Исследовано влияние концентрации, природы соли алюминия, температуры и продолжительности старения на фазовый состав, свойства образующихся осадков гидратированного оксида алюминия и его структурно-адсорбционные характеристики. Показано, что коэффициенты фильтрации осадков, полученных в сульфатных, нитратных, хлоридных растворах при нейтрализации аммиаком, находятся на уровне $6,7 \cdot 10^{-5}$ – $7,8 \cdot 10^{-7}$ м/с. Установлено, что из хлорид- и нитратсодержащих растворов с концентрацией аниона 1,8 моль/л формируется слабо окристаллизованный псевдобемит, в то время как из сульфатсодержащего раствора той же концентрации – рентгеноаморфный материал. При разбавлении сульфатсодержащей системы до концентрации 0,9 моль/л SO_4^{2-} происходит образование окристаллизованного псевдобемита, а до концентрации 0,3 моль/л SO_4^{2-} – гиббсита. Понижение температуры старения осадков до 40 °С приводит к формированию слабо окристаллизованного псевдобемита. Слабо окристаллизованный псевдобемит – порошкообразный продукт с частицами неправильной формы размером 20,0–50,0 мкм. Установлено, что удельная поверхность псевдобемита, полученного из сульфата алюминия, сравнительно выше, чем для образцов, полученных из растворов хлорида и нитрата алюминия, и составляет 407,41 м²/г. Это обусловлено наличием в нем пор диаметром, равным 3,826–4,544 нм, что в $\approx 1,5$ раза меньше, чем для образцов, синтезированных из хлорида и нитрата алюминия.

Ключевые слова: гидратированный оксид алюминия, псевдобемит, химическое осаждение, старение, пористая структура

Для цитирования. Формирование структуры псевдобемита в системе $Al_x(An)_3-NH_4OH-H_2O$ / Л. С. Ещенко, А. И. Сумич, А. В. Алексеева // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 3. – С. 183–192. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-183-192>

L. S. YESHCHANKO¹, A. I. SUMICH², A. V. Alekseeva¹¹ Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus² Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences, Minsk, Belarus**FORMATION OF THE PSEUDOBUEHMITE STRUCTURE
IN THE SYSTEM $Al_x(An)_3-NH_4OH-H_2O$**

Abstract. Hydrated aluminum oxide is widely used in various fields – from catalyst production to medicine. Several modifications of hydrated aluminum oxide are known, including gibbsite, bayerite, nordstrandite, pseudobuehmite, and boehmite. Of particular interest is the synthesis of $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ with a pseudobuehmite structure, which represents a highly dispersed aluminum hydroxide with a developed specific surface area. This study investigates the influence of aluminum salt concentration and type, aging temperature, and duration on the phase composition, properties of the resulting hydrated aluminum oxide precipitates, and their structural and adsorption characteristics. It is shown that the precipitates obtained from sulfate, nitrate, and chloride solutions by ammonia neutralization exhibit poor filterability, with filtration coefficients in the range of $6.7 \cdot 10^{-5}$ to $7.8 \cdot 10^{-7}$ m/s. It was found that slightly crystallized pseudobuehmite forms from chloride- and nitrate-containing solutions with anion concentrations of 1.8 mol/L, whereas X-ray amorphous products form from sulfate-con-

taining solutions of the same concentration. Dilution of the sulfate system to 0.9 mol/L SO_4^{2-} leads to the formation of crystalline pseudoboehmite, and further dilution to 0.3 mol/L SO_4^{2-} results in gibbsite formation. Lowering the aging temperature of the precipitates to 40 °C leads to the formation of poorly crystallized pseudoboehmite. This product is a powder composed of non-isometric particles sized 20.0–50.0 μm . The specific surface area of pseudoboehmite synthesized from aluminum sulfate was found to be higher than that of samples obtained from aluminum nitrate and chloride solutions, reaching 407.41 m^2/g . This is attributed to the presence of pores with diameters of 3.826–4.544 nm – approximately 1.5 times smaller than those in the nitrate- and chloride-derived samples.

Keywords: hydrated alumina, pseudoboehmite, chemical precipitation, aging, porous structure

For citation. Yeshchanko L. S., Sumich A. I., Alekseeva A. V. Formation of the pseudoboehmite structure in the system $\text{Al}_x(\text{An})_3\text{--NH}_4\text{OH--H}_2\text{O}$. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnyh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 3, pp. 183–192 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-183-192>

Введение. Применение оксидов алюминия во многих сферах деятельности обусловлено их уникальными химическими свойствами: они обладают каталитическими признаками, используются в качестве носителей для каталитически активных веществ (Co, Pd, Pt), в качестве абразива, который наносят на поверхность наждачной бумаги, так как обладают повышенной твердостью. Инновационным является использование их при производстве материала для эндопротезов тазобедренных суставов.

Показано [1], что свойства оксидов алюминия определяются свойствами гидроксидов-предшественников, закономерно трансформированными посредством фазовых переходов в алюмо-кислородной системе:



Гидратированный оксид алюминия существует в формах тригидрата $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (моноклинного триклинного гиббсита, байерита, нордстрандита) и моногидрата переменного состава $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (псевдобемита и бемита). Псевдобемит представляет собой высоко дисперсный гидроксид алюминия с развитой удельной поверхностью, который отличается от кристаллического бемита AlOOH наличием в структуре сверхстехиометрической воды в форме свободных молекул H_2O , связанных в межслоевом пространстве кристаллической решетки прочными водородными связями [2]. Было показано, что из-за образования связей между молекулами воды и ионами слоя изменяется локальная структура псевдобемита.

Существует ряд способов получения псевдобемита [3–5], основанных на подкислении алюмината натрия, нейтрализации солей алюминия, быстром термическом разложении гиббсита и золь-гель процессах. Применяют также нитратную и алюминатную технологию получения моногидрата оксида алюминия [6–7]. Как утверждает В. А. Дзисько [6], при нейтрализации гидроксидом натрия образуется тригидроксид алюминия – байерит, а раствором аммиака – псевдобемит. В алюминатной технологии раствор алюмината натрия смешивают с кислотой, в частности азотной, при этом pH реакционной смеси определяет фазовый состав конечного продукта. В случае осаждения при pH больше 10 происходит формирование байерита, а при pH 4–6 – псевдобемита.

Известно, что образование осадков при химическом осаждении из растворов соли алюминия протекает через образование мономеров, взаимодействие которых приводит к формированию димеров. Отмечено, что оба катиона алюминия в составе димеров являются координационно ненасыщенными, что выступает движущей силой для дальнейшего объединения димеров в более сложные структуры в виде полигидроксикомплексов, превращающихся в первичные частицы, а затем в агрегаты первичных частиц. Такие процессы протекают при зарождении твердой фазы как в кислой, так и в щелочной среде. В зависимости от условий осаждения гидратированного оксида алюминия образующиеся мономеры отличаются взаимным расположением катионов алюминия и OH-групп, что приводит к образованию различных по строению полимеров, которые разориентированы в реакционном пространстве, и в связи с этим к формированию рентгеноаморфного осадка.

Именно этапы растворения и осаждения определяют степень окристаллизованности гидроксида и, следовательно, фазовый состав, что влияет в дальнейшем на пористую структуру, величину удельной площади поверхности и термическую устойчивость [8].

Ряд авторов [3, 9–12] предлагают термические способы получения псевдобемита, например нагреванием гиббсита в неравновесных условиях, при котором происходит неполное разрушение кристаллической решетки. Известен способ [3] получения псевдобемита в результате термического разложения раствора нитрата алюминия при 300–700 °С методом распылительной сушки, регенерации образующихся оксидов азота в концентрированную азотную кислоту с ее возвратом на начальную стадию процесса. Синтез гидроксида алюминия с псевдобемитной структурой включает получение промежуточного алюмооксидного продукта путем прокалки гексагидрата хлорида алюминия и его гидратацию не менее 12 ч [10]. В работе О. Б. Павловой-Веревкиной и Ю. Е. Рогинской [13] показано влияние условий гидротермальной обработки осадков псевдобемита на структурно-адсорбционные свойства, в частности величину удельной поверхности. Несмотря на достаточно большое число работ по синтезу псевдобемита, сведения относительно его получения и структурно-адсорбционных свойств часто противоречивы и ограничены.

Целью данной работы явилось установление влияния природы реагентов, условий синтеза на фазовый состав и свойства гидратированного оксида алюминия со структурой псевдобемита.

Экспериментальная часть. Для получения гидратированного оксида алюминия использовали метод химического осаждения. Исходными реагентами явились: хлорид алюминия $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (марки «ч.») (ГОСТ 3759-75), нитрат алюминия $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (марки «ч.») (ГОСТ 3757-75), сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (марки «ч.») (ГОСТ 3758-75), аммиак водный (марки «ч. д. а.») (ГОСТ 3760-79). Получение гидратированного оксида алюминия проводили согласно схеме, представленной на рис. 1.

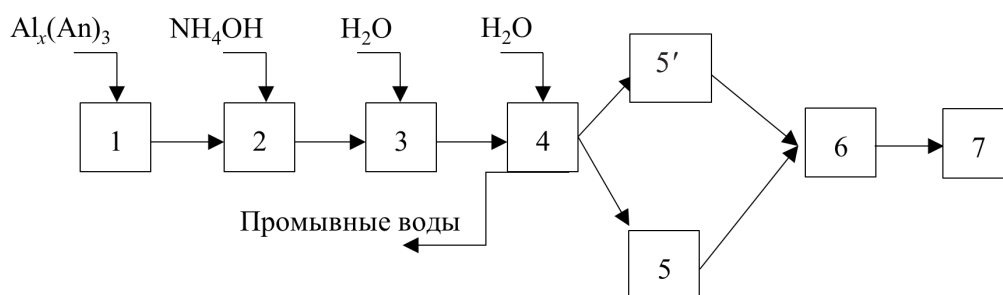


Рис. 1. Схема получения гидратированного оксида алюминия: x – величина заряда аниона An^{x-} ; 1 – приготовление раствора соли алюминия; 2 – химическое осаждение; 3 – старение; 4 – фильтрация и отмывка; 5 – микроволновая сушка; 5' – сушка в сушильном шкафу; 6 – измельчение и классификация; 7 – термообработка

Fig. 1. Scheme for synthesis of hydrated aluminum oxide: x – anion charge An^{x-} ; 1 – preparation of aluminum salt solution; 2 – chemical precipitation; 3 – aging; 4 – filtration and washing; 5 – microwave drying; 5' – drying in the oven; 6 – milling and classification; 7 – heat treatment

Концентрация раствора соли алюминия составила 0,3; 0,6; 1 моль/л, содержание аммиака в растворе – 25,5 мас.%. Химическое осаждение проводили при 80–85 °С при постоянном перемешивании с использованием лабораторной вертикальной роторной мешалки и непрерывном измерении pH среды. Добавление осадителя прекращали при pH среды 9,0–9,5. Продукты осаждения подвергали старению при температурах 40 и 100 °С и продолжительности 15–22 ч. Продукты осаждения, полученные при нейтрализации раствора сульфата алюминия аммиаком, разбавляли водой до концентрации SO_4^{2-} в жидкой фазе 0,3–0,9 моль/л. Твердую фазу отделяли фильтрацией на вакуум-филт্রে, определяя при этом коэффициент фильтрации, затем осуществляли отмывку горячей дистиллированной водой (80–90 °С) до отрицательной реакции на хлорид-, нитрат- или сульфат-ионы. Полученный продукт сушили в сушильном шкафу при температуре 70–75 °С до постоянной массы и подвергали микроволновой обработке в микроволновой печи при мощности 70 В, после чего его измельчали, подвергали классификации и термообработывали. Химический состав продуктов определяли по стандартным методикам, фазовый состав – методом рентгенофазового анализа с помощью рентгеновского дифрактометра 08 ADVANCE фирмы BRUKER AXS (Германия), размер частиц определяли на лазерном микроанализаторе FRITSCH ANALYSETTE 22 (Германия).

Результаты и их обсуждение. Согласно экспериментальным данным на стадии химического осаждения при pH 1–4 система остается гомогенной, дальнейшее повышение pH приводит к образованию микрогетерогенной коллоидно-химической системы. Следует отметить, что при осаждении из нитрата алюминия формируется гелеобразный осадок, а из сульфата алюминия и хлорида алюминия – золеобразный. Образовавшаяся твердая фаза, как известно, представляет собой метастабильное аморфное вещество, которое в ходе старения уплотняется, а его объем уменьшается и появляется граница раздела фаз. Условия старения продуктов осаждения, брутто-состав, фазовый состав высушенных образцов, их насыпная и истинная плотности представлены в табл. 1.

Из анализа данных следует, что осадки, полученные в сульфатных, нитратных, хлоридных растворах при нейтрализации аммиаком, являются труднофильтруемыми, поскольку коэффициенты фильтрации находятся на уровне $6,7 \cdot 10^{-5}$ – $7,8 \cdot 10^{-7}$ м/с. Как видно из табл. 1, на формирование кристаллического псевдобемита оказывает влияние природа соли алюминия. Так, при концентрации 1,8 моль/л нитрат-, хлорид-анионов в жидкой фазе формируется слабо окристаллизованный псевдобемит, в то время как в сульфатной системе при такой же концентрации SO_4^{2-} – рентгеноаморфный.

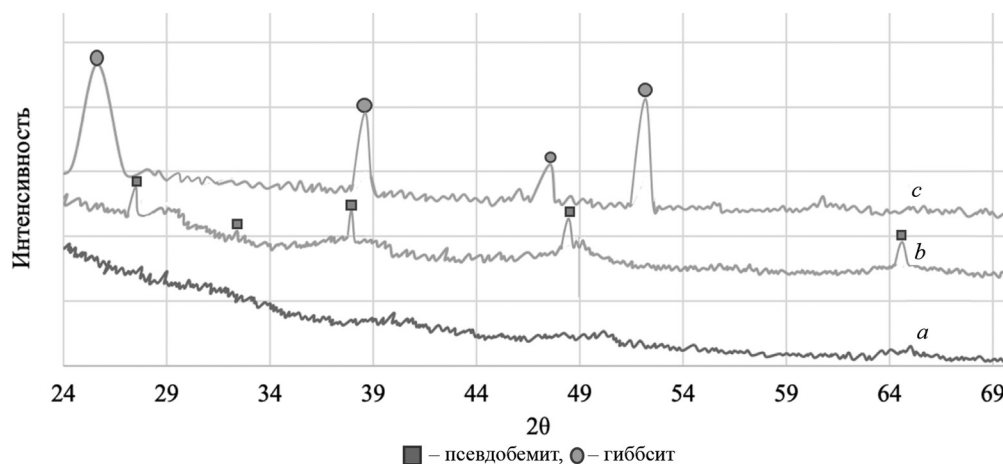
Таблица 1. Условия старения твердой фазы и результаты анализов

Table 1. Conditions of precipitate aging and results of analysis

№ образца	Условия старения продуктов осаждения в системах Al _x (An) ₃ -NH ₄ OH-H ₂ O			Результаты исследований					
	Концентра- ция An ^{x-} - в жидкой фазе, моль/л	T, °C	Продолжи- тельность, ч	Коэффициент фильтрации твёрдой фазы, м/с	Брутто-состав продукта	Фазовый состав продукта	Плотность, г/см ³		
							Истинная	Насыпная	
An ^{x-} -SO ₄ ²⁻									
1	1,8	100	15	3,40 · 10 ⁻⁷	Al ₂ O ₃ · 1,63H ₂ O	Аморфный продукт	2,30	1,42	
2	0,9	100	15	6,71 · 10 ⁻⁵	Al ₂ O ₃ · 1,46H ₂ O	Псевдобемит	2,40	1,60	
3	0,3	100	15	8,08 · 10 ⁻⁵	Al ₂ O ₃ · 2,98H ₂ O	Окристаллизованный гиббсит	2,32	1,73	
4	0,3	40	22	3,60 · 10 ⁻⁵	Al ₂ O ₃ · 1,81H ₂ O	Слабо окристаллизованный псевдобемит	2,12	1,90	
An ^{x-} -NO ₃ ⁻									
5	1,8	100	15	7,83 · 10 ⁻⁷	Al ₂ O ₃ · 1,47H ₂ O	Слабо окристаллизованный псевдобемит	2,40	1,45	
6	1,8	40	15	7,81 · 10 ⁻⁶	Al ₂ O ₃ · 1,97H ₂ O	Слабо окристаллизованный псевдобемит	2,53	1,70	
An ^{x-} -Cl ⁻									
7	1,8	40	15	7,3 · 10 ⁻⁷	Al ₂ O ₃ · 1,81H ₂ O	Слабо окристаллизованный псевдобемит	2,45	1,69	

При разбавлении продуктов осаждения водой до концентрации 0,9 моль/л SO_4^{2-} уже происходит образование окристаллизованного псевдобемита, а до концентрации 0,3 моль/л SO_4^{2-} – гиббсита (рис. 2). Понижение температуры старения осадков до 40 °C приводит к формированию слабо окристаллизованного псевдобемита (см. табл. 1).

Как следует из табл. 1, брутто-состав исследуемых продуктов соответствует гидратированному оксиду алюминия, количество молей воды в котором варьируется от 1,5 до 2,0, что, скорее всего, связано с различной окристаллизованностью псевдобемита. В соответствии со стехиометрическим составом псевдобемита AlOOH на 1 моль Al_2O_3 приходится 1 моль химически связанной H_2O . Таким образом, избыточное количество воды (0,5–1,0 моль) относится, как отмечено авторами [14, 15], к сверхстехиометрической, локализованной в межслоевом пространстве.

Рис. 2. Рентгенограммы: *a* – образец 1, *b* – образец 2 и *c* – образец 4 (табл. 1)Fig. 2. X-ray diffractograms of samples 1 – *a*, 2 – *b* and 4 – *c* (table 1)

Насыпная и истинная плотность исследуемых образцов почти одинакова, что может свидетельствовать о близости их дисперсности и пористости.

На рис. 3 представлена зависимость потери массы образцом 2 (согласно табл. 1) от температуры термообработки. Интенсивное выделение воды происходит до 450 °С. В этом интервале удаляется 1,46 моль воды, 1 моль химически связанной H_2O и 0,46 – избыточной и образуется безводный Al_2O_3 . Удаление 0,46 моль физико-химической воды в интервале температур 100–180 °С может свидетельствовать о наличии прочных водородных связей в межслоевом пространстве решетки псевдобемита, при этом его структура не изменяется.

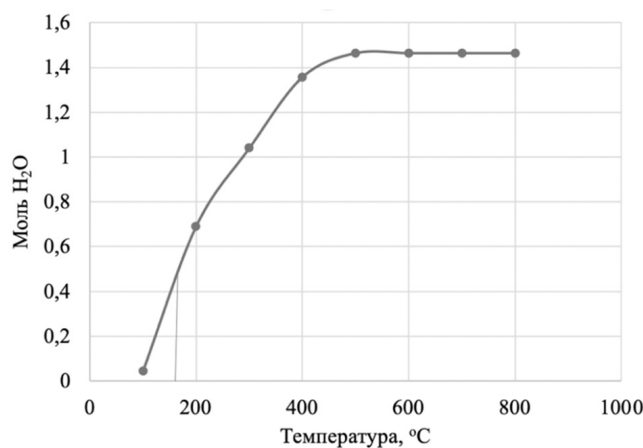


Рис. 3. Зависимость потери массы образца 2 (табл. 1) от температуры

Fig. 3. Dependence of mass loss of sample 2 (table 1) on temperature

В соответствии с результатами исследования размеров частиц все образцы слабо окристаллизованного псевдобемита являются полидисперсными – преобладающий размер частиц составляет 20,0–50,0 мкм. На долю частиц размером 5,0–10,0 мкм приходится 9–13 %, а 10,0–20,0 мкм – 18–24 % (рис. 4).

Таким образом дисперсность образцов близка, о чем свидетельствуют и микрофотографии (увеличение 1 000 раз), представленные на рис. 5, которые были получены с помощью электронной микроскопии на приборе Tescan Mira3 (Чехия). На снимках видно, что доля мелких неизометричных образований с размером до 10–20 мкм выше по сравнению с более крупными, характеризующимися неровными гранями обломочного типа с длиной на уровне 45–85 мкм.

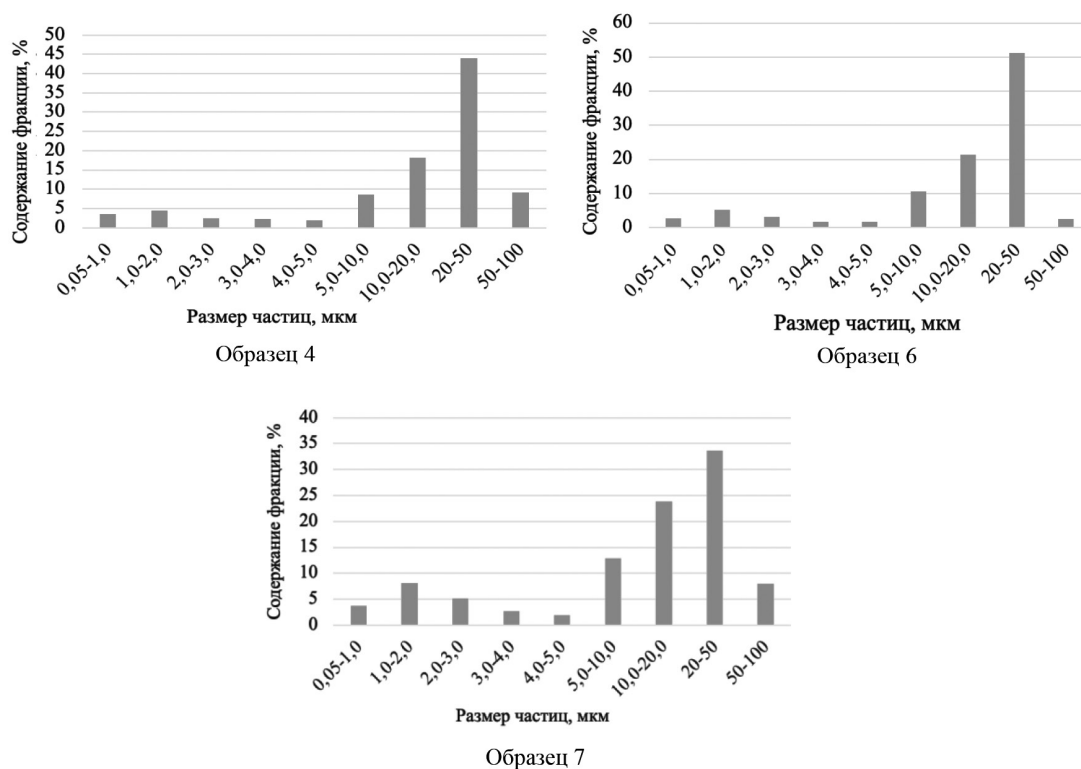


Рис. 4. Распределение частиц по размерам для образцов псевдобемита

Fig. 4. Particle size distribution for samples of pseudoboehmite

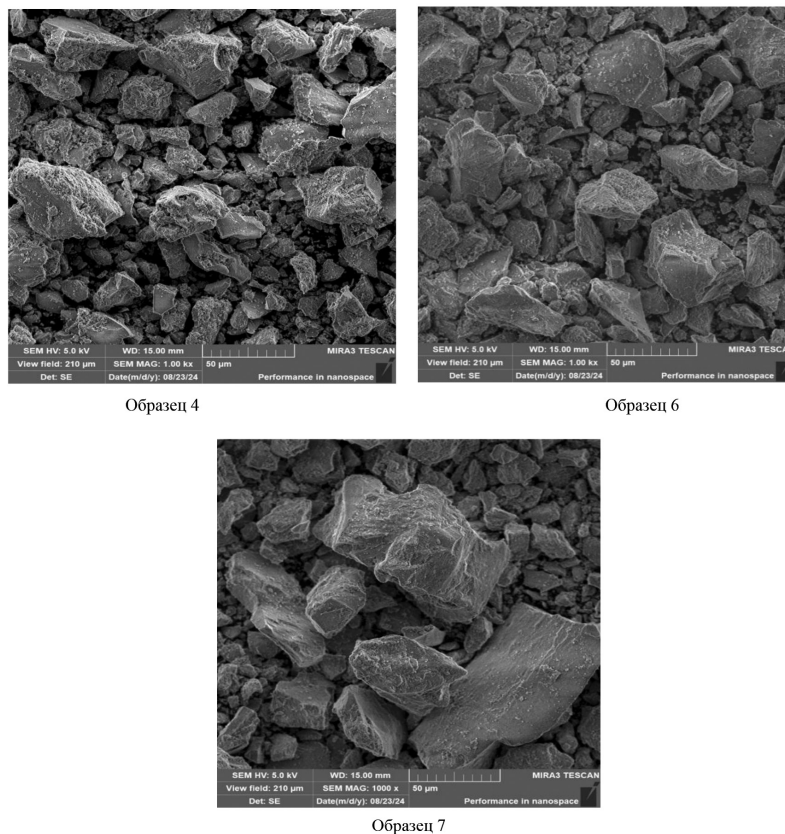


Рис. 5. Микрофотографии образцов псевдобемита (1 000×)

Fig. 5. SEM micrographs of samples of pseudoboehmite (1 000×)

При увеличении до 20 000–50 000 раз на снимке видны конгломераты, состоящие из небольших прочно сросшихся частиц, образовавшихся на стадии осаждения, в виде золь-, гелеобразного гидратированного оксида алюминия. Примечательно, что частицы псевдобемита, полученного из хлорида и нитрата алюминия, имеют округлую форму, что, скорее всего, обусловлено его низкой степенью окристаллизованности. На микрофотографии псевдобемита, полученного в разбавленной сульфатсодержащей системе, видны частицы, имеющие огранку. Во всех случаях на поверхности частиц наблюдаются небольшие мелкие образования, которые можно отнести к неотмытым солям аммония.

Для установления влияния условий синтеза псевдобемита на его пористую структуру определены структурные характеристики исследуемых образцов, а именно: удельная поверхность, объем и диаметр пор. Стандартные измерения изотерм адсорбции-десорбции азота (N_2 ; 77 К; $\omega_{N_2} = 0,162 \text{ нм}^2$) осуществляли на анализаторе площади поверхности и пористости ASAP 2020MP (Micromeritics, США). Удельную поверхность, объем и диаметр пор определяли автоматически с помощью программного обеспечения к прибору. Для расчета удельной поверхности использовали методы БЭТ (BET) и Ленгмюра (L). Удельный объем пор, средний диаметр пор рассчитывали методом Барретта–Джойнера–Халенды (BJH). Результаты исследований представлены на рис. 6 и в табл. 2.

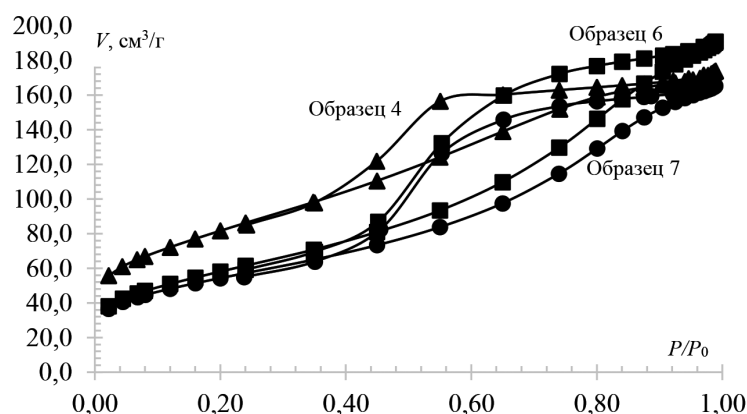


Рис. 6. Изотермы сорбции-десорбции слабо окристаллизованного псевдобемита

Fig. 6. Isotherms of sorption-desorption of poorly crystallized pseudoboehmite

Таблица 2. Структурно-адсорбционные характеристики образцов псевдобемита

Table 2. Structural and adsorption characteristics of samples of pseudoboehmite

№ образца	Удельная поверхность по БЭТ, м²/г	Удельная поверхность по Ленгмюру, м²/г	Средняя ширина пор по изотерме адсорбции (по БЭТ), нм	Средняя ширина пор по изотерме десорбции (по БЭТ), нм	Среднее значение диаметра пор (по изотерме сорбции), нм	Среднее значение диаметра пор (по изотерме десорбции), нм
4	293,68	407,41	3,638	3,615	4,544	3,826
6	210,55	293,79	5,549	5,523	6,110	4,361
7	195,40	271,24	5,203	5,178	6,101	4,168

Анализ результатов показывает, что с увеличением относительных давлений величина адсорбции возрастает до 60–65 см³/г для образцов, полученных из хлоридных и нитратных растворов, и 85,0–90,0 см³/г – из сульфата алюминия. В области $P/P_0 = 0,4–0,5$ наблюдается резкий подъем изотерм адсорбции и при $P/P_0 = 1$ сорбционный объем достигает 160–170 см³/г в зависимости от условий получения. Обращает на себя внимание и ход кривой десорбции для псевдобемита, формирование структуры которого происходило при старении в алюмосульфатной системе с концентрацией $(SO_4)^{2-}$ 0,3 моль/л (см. табл. 1). Согласно изотерме адсорбции в нем присутствует значительная доля узких пор (микропор), которые заполняются азотом уже при низких относительных давлениях. Исходя из табл. 2, средняя ширина пор для данного образца

составляет 3,615–3,638 нм, что в 1,5 раза меньше ширины пор в образцах 6 и 7. Диаметр пор для псевдобемита, полученного из сульфата алюминия при заданных условиях, сравнительно также меньше, что в конечном счете объясняет его высокую удельную поверхность, равную 407,41 м²/г. Для образцов, полученных из нитратных и хлоридных растворов, значение удельной поверхности значительно ниже. Отмеченные отличительные особенности изотерм адсорбции-десорбции могут быть связаны с дисперсностью образцов, степенью их окристаллизованности, наличием вторичных термодинамически более устойчивых агломератов, образованных при старении осадков.

Распределение объема пор по размерам для исследуемых образцов изображены на рис. 7.

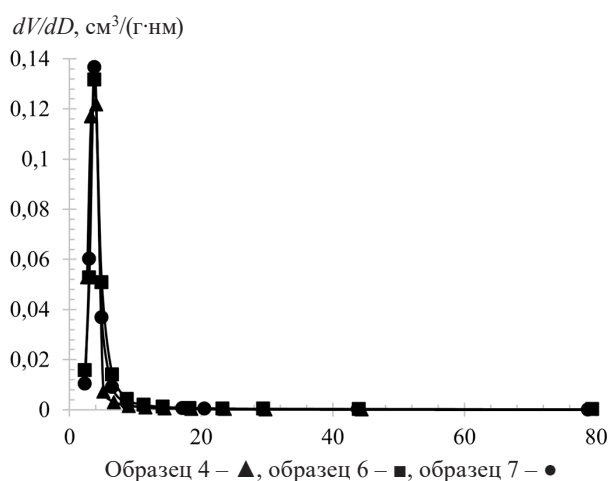


Рис. 7. Дифференциальные кривые распределения пор по размерам для образцов псевдобемита

Fig. 7. Differential curves of pore size distribution for samples of pseudoboehmite

Кривые распределения для образцов почти аналогичны – наблюдается узкий интервал диаметра пор в диапазоне примерно 0,1–10 нм. Можно полагать, что существенную роль в структурных характеристиках образцов играет размер и форма частиц, плотность их упаковки.

Заключение. Исследованы условия формирования гидратированного оксида алюминия со структурой псевдобемита в системе $\text{Al}_x(\text{An})_3\text{--NH}_4\text{OH--H}_2\text{O}$, где $\text{An}^{x-} = \text{SO}_4^{2-}, \text{NO}_3^-, \text{Cl}^-$. Установлено влияние природы аниона на образование и формирование AlOOH со структурой псевдобемита. Показано, что при прочих равных условиях осаждения формирование слабо окристаллизованного псевдобемита происходит из растворов хлорида и нитрата алюминия, а из раствора сульфата алюминия образуется рентгеноаморфный продукт. Отмечены особенности формирования псевдобемита на стадии старения осадка, полученного из сульфата алюминия. Определены структурно-адсорбционные характеристики псевдобемита. Установлено, что максимальная удельная поверхность, равная 407,41 м²/г, наблюдается для образца, полученного из сульфата алюминия, вследствие наличия в его структуре пор диаметром 3,826–4,544 нм.

Список использованных источников

1. Чукин, Г. Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций / Г. Д. Чукин. – М. : Принта, 2010. – 288 с.
2. Роде, Е. Я. Физико-химическое изучение окислов и гидроокислов металлов / Е. Я. Роде // Журнал неорганической химии. – 1956. – Вып. 1. – С. 1430–1439.
3. Патент RU 2284297, МПК B01J 21/04 (2006.01). Способ получения псевдобемита : № 2001102976 : заявл. 02.02.01 : опубл. 27.09.06 / Йохансенс Кельд. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2284297C2/ru> (дата обращения: 23.03.2025).
4. Patent USA 4120943, C01F 7/02, C01F 7/34. Process for producing pseudobemite : № 751683 : filing date 17.12.76 : publ. date 17.02.78 / Toshiyuki Iwaisako, Naomi Yamaguchi, Hisao Yomogida. – URL: <https://patents.google.com/patent/US4120943A/en> (date of access: 23.03.2025).
5. Патент RU 2124478, МПК7 C0114 (2006.01). Способ получения гидроксида алюминия : № 96113071/25 : заявл. 01.07.96 ; опубл. 10.01.99 / Мельников В. Б., Вершинин В. И. ; заявитель Мельников Вячеслав Борисович. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2124478C1/ru> (дата обращения: 23.03.2025).

6. Дзисько, В. А. Основные методы получения активного оксида алюминия / В. А. Дзисько, А. С. Иванова // Известия Северного отделения Академии наук СССР. Серия химических наук. – 1985. – № 15. – С. 110–119.
7. Стайлз, Э. Б. Носители и нанесенные катализаторы. Теория и практика / Э. Б. Стайл. – М. : Химия, 1991. – 232 с.
8. Mulcahy, F. M. The effect of the isoelectric point on the adsorption of molybdates on fluoride-modified aluminas / F. M. Mulcahy, M. Houalla, D. M. Hercules // Journal of catalysis. – 1987. – Vol. 106, № 1. – P. 210–215. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(87\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0021-9517(87)90225-9)
9. TSEFLAR™ – the centrifugal flash reactor for rapid thermal treatment of powdered materials / V. I. Pinakov, O. I. Stoyanovsky, Yu. Yu. Tanashev [et. al.] // Chemical Engineering Journal. – 2005. – Vol. 107, № 1. – P. 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.12.026>
10. Патент RU 2749511, МПК C01F 7/02 (2006.01). Способ получения псевдобемита : № 2020133477 : заявл. 13.10.20 : опубл. 11.06.21 / Кибартас Д. В., Сеньута А. С., Баянов В. А., Серебряков М. А., Князев А. В., Максимова Ю. О. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2749511C1/ru> (дата обращения: 23.03.2025).
11. Патент RU 2234460, МПК C01F 7/02 (2006.01). Способ получения гидроксида алюминия псевдобитной структуры и гамма-оксида алюминия на его основе : № 2003114558/15 : заявл. 15.05.03 : опубл. 20.06.04 / Иванова А. С., Карасюк Н. В., Кругляков В. Ю., Танашев Ю. Ю., Мороз Э. М., Золотарский И. А., Пармон В. Н. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2234460C1/ru> (дата обращения: 23.03.2025).
12. Патент RU 2335457, МПК C01F 7/44 (2006.01). Способ получения гидроксида алюминия псевдобемитной структуры и гамма-оксида алюминия на его основе : № 2006140041/15 : заявл. 13.11.06 : опубл. 10.10.08 / Исапова Л. А., Харина И. В., Золотарский И. А., Пармон В. Н. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2335457C2/ru> (дата обращения: 23.03.2025).
13. Павлова-Веревкина, О. Б. Получение и свойства стабильных золь гидроксидов алюминия. Изучение процесса пептизации высокодисперсного гидроксида алюминия / О. Б. Павлова-Веревкина, Ю. Е. Рогинская // Коллоидный журнал. – 1993. – Т. 55, № 3. – С. 127–132.
14. Захарченя, Р. И. Влияние температуры на фазовый состав и свойства продуктов гидролиза алкоксидов алюминия / Р. И. Захарченя, Т. Н. Василевская // Журнал прикладной химии. – 1992. – Т. 65, № 12. – С. 2707–2715.
15. Патент RU 2017714, МКИ C01B 25/36 (2006.01). Способ получения растворов алкоксидов металлов : № 5027201/04 : заявл. 20.05.93 : опубл. 20.05.94 / Соловьева Л. И., Ковсман Е. П., Сушкина Т. В., Яновская М. И., Дорохова О. А., Воротилов К. А. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2017714C1/ru> (дата обращения: 23.03.2025).

References

1. Chukin G. D. *Structure of aluminium oxide and catalysts for hydrodesulphurization. Reaction mechanisms*. Moscow, Printa Publ., 2010. 288 p. (in Russian).
2. Rode E. Ya. Physico-chemical study of metal oxides and hydroxides. *Zhurnal neorganicheskoi khimii = Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1956, no. 1, pp. 1430–1439 (in Russian).
3. Kel'd I. *Method of obtaining of pseudoboehmite*. Patent RU no. 2284297. Publ. date 27.09.2006 (in Russian).
4. Iwaisako T., Yamaguchi N., Yomogida H. *Process for producing pseudoboehmite*. Patent USA no. 4120943. Publ. date 17.02.1978.
5. Mel'nikov V. B., Vershinin V. I. *Method for producing aluminium hydroxide*. Patent RU no. 2124478. Publ. date 10.01.1999 (in Russian).
6. Dzis'ko V. A., Ivanova A. S. Main methods for producing active aluminium oxide. *Izvestiya Severnogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya khimicheskikh nauk [Proceedings of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR. Series of Chemical Sciences]*, 1985, no. 15, pp. 110–119 (in Russian).
7. Stailz E. B. *Carriers and applied catalysts. Theory and practice*. Moscow, Khimiya Publ., 1991. 232 p. (in Russian).
8. Mulcahy F. M., Houalla M., Hercules D. M. The effect of the isoelectric point on the adsorption of molybdates on fluoride-modified aluminas. *Journal of Catalysis*, 1987, no. 106, pp. 210–215. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(87\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0021-9517(87)90225-9)
9. Pinakov V. I., Stoyanovsky O. I., Tanashev Yu. Yu., Pikarevsky A. A., Grinberg B. E., Dryab V. N., Kulik K. V., Danilevich V. V., Kuznetsov D. V., Parmon V. N. TSEFLAR™ – the centrifugal flash reactor for rapid thermal treatment of powdered materials. *Chemical Engineering Journal*, 2005, vol. 107, no. 1, pp. 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.12.026>
10. Kibartas D. V. *Sposob polucheniya psevdobemita. Method for producing pseudoboehmite*. Patent RU no. 2020133477. Publ. date 11.06.2021 (in Russian).
11. Ivanova A. S. *Method for producing aluminium hydroxide of pseudoboehmite's structure and aluminium gamma oxide on its bases*. Patent RU no. 2234460. Publ. date 20.06.2004 (in Russian).
12. Isupova L. A. *Method for producing aluminium hydroxide of pseudoboehmite's structure and aluminium gamma oxide on its bases*. Patent RU no. 2335457. Publ. date 10.10.2008 (in Russian).
13. Pavlova-Verevkin O. B., Roginskaya Yu. E. Production and properties of stable sols of aluminium hydroxide. Investigation of the process of peptization of highly dispersed aluminium hydroxide. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 1993, vol. 55, no. 3, pp. 127–132 (in Russian).
14. Zakharchenya R. I., Vasilevskaya T. N. Influence of temperature on phase composition and properties of products of hydrolysis of aluminium alkoxides. *Zhurnal prikladnoi khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 1992, vol. 65, no. 12, pp. 2707–2715 (in Russian).
15. Solov'eva L. I., Kovsman E. P., Sushkina T. V. *Method for the production of solutions of metal alkoxides*. Patent RU no. 2017714. Publ. date 20.05.1994 (in Russian).

Информация об авторах

Ещенко Людмила Семеновна – доктор технических наук, профессор. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yeshchanko@belstu.by

Сумич Андрей Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sumich.andrey@gmail.com

Алексеева Анастасия Викторовна – магистрант. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alekseevanasta285@gmail.com

Information about the authors

Yeshchanko Liudmila S. – Dr. Sci. (Engineering), Professor. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yeshchanko@belstu.by

Sumich Andrei I. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sumich.andrey@gmail.com

Alekseeva Anastasiya V. – Master's Student (Engineering). Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alekseevanasta285@gmail.com