

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ
INORGANIC CHEMISTRY

УДК 54.052+54.77.023.5+54-31
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-281-288>

Поступила в редакцию 16.01.2018
Received 16.01.2018

**И. В. Мацукевич, Н. П. Крутько, Л. В. Овсенко, О. В. Полховская,
Д. В. Губицкий, В. В. Вашук**

Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ НА АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ПОРОШКА MgO**

Аннотация. Оксид магния находит широкое применение в качестве адсорбента, катализатора, идентификатора загрязняющих химических и токсических веществ, в процессах водо- и газоочистки. В настоящей работе методом осаждения, распылительного пиролиза и глицин-цитрат-нитратным методом синтезированы мезопористые порошки оксида магния, изучена их кристаллическая структура, микроструктура, гранулометрический состав и адсорбционные свойства. Определены наиболее оптимальные условия получения оксида магния глицин-цитрат-нитратным методом, которые позволяют получить порошок со средними размерами первичных частиц 12 нм и наименьшими размерами вторичных частиц – от 70 нм. Установлено влияние способа получения на адсорбционные свойства наноструктурированного порошка оксида магния. Высокие значения общего объема пор 1,038 см³/г продемонстрировал порошок MgO, полученный методом осаждения.

Ключевые слова: оксид магния, мезопористый порошок, метод осаждения, метод распылительного пиролиза, глицин-цитрат-нитратный метод, размер частиц, адсорбционные свойства

Для цитирования. Влияние метода получения на адсорбционные свойства наноструктурированного порошка MgO / И. В. Мацукевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, №3. – С. 281–288. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-281-288>

I. V. Matsukevich, N. P. Krutko, L. V. Ovseenko, O. V. Polhovskaja, D. V. Hubitski, V. V. Vashook

Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**EFFECT OF PREPARATION METHOD ON PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED
MgO POWDER**

Abstract. Magnesium oxide is widely used as an adsorbent, catalyst, identifier of chemical and toxic pollutants, in water and gas purification processes. Mesoporous magnesium oxide powder has been synthesized by the method of deposition, spray pyrolysis and glycine-citrate-nitrate method, their crystal structure, microstructure, granulometric composition and adsorption properties have been studied. Optimal conditions for the production of magnesium oxide by the glycine-citrate-nitrate method have been determined, which make it possible to obtain a powder with average primary particle sizes of 12 nm and the smallest sizes of secondary particles starting from 70 nm. The influence of the method of obtaining nanostructured magnesium oxide powder on the physicochemical properties is established. High values of the total pore volume of 1.038 cm³/g exhibited the MgO powder obtained by the precipitation method.

Keywords: magnesium oxide, mesoporous powder, precipitation method, spray pyrolysis method, glycine-citrate-nitrate method, particle size, adsorption properties

For citation. Matsukevich I. V., Krutko N. P., Ovseenko L. V., Polhovskaya O. V., Hubitski D. V., Vashook V. V. Effect of preparation method on physicochemical properties of nanostructured MgO powder. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 281–288 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-281-288>

Введение. Оксид магния находит широкое применение в качестве адсорбента [1], для гетерогенного катализа в органическом синтезе [2], в производстве датчиков влажности и кислых газов, в процессах водо- и газоочистки от кислых примесей [3, 4], для дезактивации химического оружия и боевых отравляющих веществ и нейтрализации токсических выбросов [5], в качестве антибактериального агента [6], огнеупорного материала [7] и др. Степень дисперсности, микроструктура, гранулометрический состав порошков MgO в большой мере определяют область или пригодность его использования. В то же время проблема эффективного регулирования дисперсности и синтеза порошков MgO с узким распределением частиц по размерам остается нерешенной, несмотря на высокую активность исследований в этом направлении.

Для получения высокоактивных оксидных порошков зачастую используются методы, в соответствии с которыми исходные компоненты берутся в виде жидких растворов (например, метод осаждения). Образующиеся в этом случае осадки при последующей обработке должны пройти этапы предварительного обжига и измельчения. Методы, включающие получение аэрозоля распылением раствора соответствующей соли, позволяют избежать таких стадий, как осаждение, отделение высокодисперсных частиц от жидкой фазы, предварительный обжиг и помол [8]. В работах [9–11] методом распылительного пиролиза как разновидности термогидролиза получены порошки MgO и показано, что использование данного метода позволяет контролировать условия образования твердых частиц и, следовательно, управлять морфологией и размерами частиц конечного порошкообразного продукта. Глицин-цитрат-нитратный метод, являющийся одним из разновидностей самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), позволяет получить высокодисперсные порошки и характеризуется высокой производительностью [12–14]. Высокодисперсные порошки оксидов металлов также могут быть получены другими методами – газофазным [15], плазмохимическим [6], гидротермальным синтезом [16–18] и др.

Цель работы – получение наноструктурированных порошков оксида магния тремя различными методами – методом осаждения, распылительного пиролиза и глицин-цитрат-нитратным методом, а также изучение влияния метода получения на дисперсность, микроструктуру и физико-химические свойства полученных материалов.

Методика эксперимента

Синтез и подготовка образцов. Порошки оксида магния получали методом осаждения, распылительного пиролиза и глицин-цитрат-нитратным методом. Для получения порошка оксида магния методом осаждения (образец I) к 0,5 М водному раствору хлорида магния, приготовленному из $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (ч.д.а.), в эквимолярном соотношении с постоянной скоростью около 1 мл/с при постоянном перемешивании добавляли 0,5 М водный раствор осадителя NaOH (ч.д.а.). После осаждения полученный гелеобразный осадок многократно промывали дистиллированной водой, фильтровали и сушили до постоянной массы при температуре 105 °С. Оксид магния получали отжигом образца I при температуре 550 °С в течение 2 ч. Затем полученные образцы подвергали тщательному перетиранию.

Получение порошков оксида магния методом распылительного пиролиза (образец II) из $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (ч.д.а.) проводили на основе раствора хлорида магния с концентрацией 20 мас. %. Раствор соли фильтровали через бумажный обеззоленный фильтр (ТУ 6-09-1678-95). Плотность раствора хлорида магния определяли при помощи ареометра АОН-4 (ГОСТ 18481-81). С помощью насоса DLX-МА/МВ и полуконусной туманообразующей форсунки арт. ААЗ-А0100-303SS раствор подавали в кварцевую трубу, находящуюся в горячей зоне печи SNOL 0.3/1250. Температура процесса распылительного пиролиза составляла 700 °С. После завершения процесса образующийся оксид в основном находился на выходе из печи, а также частично в горячей зоне. Процесс распылительного пиролиза проводили при небольшом вакууме (давление в камере составляло около 98 кПа) с последующим улавливанием образующегося хлорида водорода в склянке Дрекслея и барботажной камере.

Для получения порошка оксида магния глицин-цитрат-нитратным методом соответствующее количество 2М водного раствора нитрата магния, приготовленного из $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (ч.д.а.), смешивали с определенным количеством аминокислоты (ч.д.а.) и лимонной кислоты (х.ч.) при мольном соотношении углерод/азот (С/N), равном 0,27 для образца III а и 0,25

для образца III б. Растворы упаривали при постоянном перемешивании на магнитной мешалке ИКА С-MAG HS-7 при температуре около 200 °С. В ходе испарения растворы загустевали и превращались в гель. Гель превращался в ксерогель, который вспенивался и, наконец, воспламенялся в отдельной точке. Фронт горения распространялся в течение нескольких секунд практически на всю массу вспененного полупродукта. В случае образца III б фронт горения распространялся быстрее. В результате сгорания геля образовывался светло-коричневый порошок, который после термообработки на воздухе при 550 °С в течение 2 ч превращался в порошок белого цвета.

Оборудование и методы исследования. Идентификацию образцов проводили при помощи рентгенофазового анализа (РФА) (рентгеновский дифрактометр Дрон-3, Cu-K α -излучение). Размеры кристаллитов (t , нм), т.е. размеры первичных частиц, оценивали по уширениям рентгеновских дифракционных пиков с помощью формулы Дебая–Шеррера.

Гранулометрический состав (распределение по размерам вторичных частиц) порошков определяли при помощи системы для исследования наночастиц Malvern Zetasizer Nano ZS (Великобритания). Микроструктуру порошков исследовали растровым микроскопом Hitachi S-4800 (Япония). Исследования гранулометрического состава порошков MgO проводили, предварительно обработав их спиртовые суспензии в ультразвуковой ванне с рабочей частотой $17 \pm 1,7$ кГц в течение 30 мин. Для изучения микроструктуры порошков оксида магния спиртовые суспензии, обработанные таким образом, наносили на кремниевые подложки и затем сушили при температуре 100 °С.

Адсорбционные свойства образцов оценивали объемным методом на анализаторе площади поверхности и пористости ASAP 2020 MP (Micromeritics, США) из изотерм низкотемпературной (–196 °С) статической физической адсорбции–десорбции азота. Удельную поверхность определяли многоточечным методом Брунауэра–Эммета–Теллера ($A_{ВЕТ}$, м²/г). Удельный объем пор (V_{spdes} , см³/г), средний диаметр пор (D_{spdes} , нм) и распределение пор по размерам в линейной форме определяли методом Барретта–Джойнер–Халенды, используя десорбционную ветвь изотермы и модель цилиндрических пор. Перед анализом образцы вакуумировали в течение 1 ч при температуре 100 °С и остаточном давлении $133,3 \cdot 10^{-3}$ Па.

Результаты и их обсуждение. Согласно результатам РФА (рис. 1), все образцы после окончания синтеза представляли собой оксид магния со структурой периклаза. Параметр элементарной ячейки составил $a = 0,4210–0,4225$ нм, что хорошо согласуется с литературными данными [19]. Размеры кристаллитов (т. е. размеры первичных частиц) оксида магния были в пределах 11–38 нм. Заметно большие размеры кристаллиты характерны для образца, полученного методом распылительного пиролиза при температуре 700 °С (таблица). Для остальных образцов

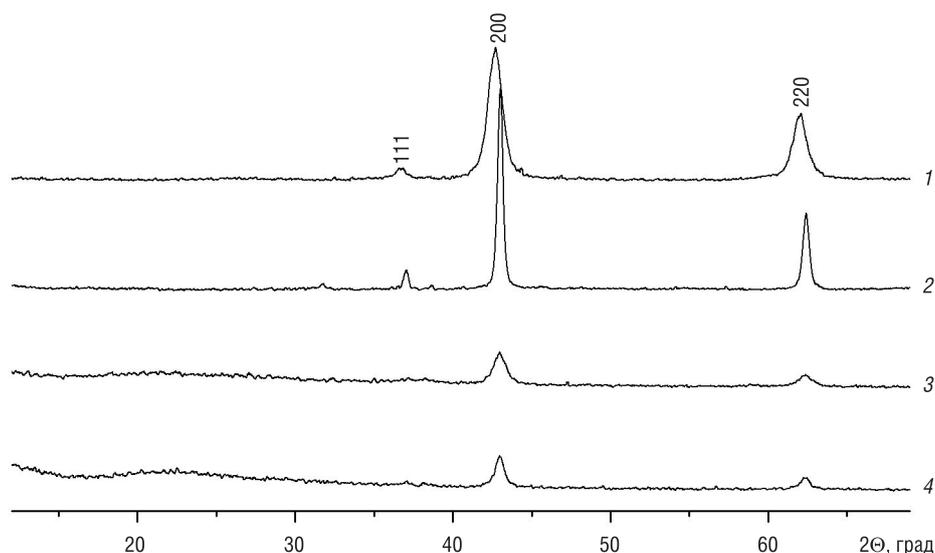


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов оксида магния I (1), II (2), III а (3) и III б (4)

Fig. 1. X-ray diffractograms of the magnesium oxide samples I (1), II (2), III a (3) and III б (4)

Значения параметров кристаллической структуры (a , V) и размеры первичных частиц (t_1), размеры преобладающей фракции вторичных частиц (t_2^{pr}), удельная поверхность (A_{BET}), общий объем пор (V_{spdes}), средний диаметр пор (D_{spdes}) и насыпная плотность ($\rho^{нас}$, г/см³) оксида магния, полученного различными методами

Crystal lattice parameters (a , V), primary particle sizes (t_1), size of major fraction of secondary particles (t_2^{pr}), specific surface (A_{BET}), total pore volume (V_{spdes}), average pore diameter (D_{spdes}) and bulk density of magnesium oxide produced by different methods

Образец	a , нм	V , нм ³	t_1 , нм	t_2^{pr} , нм	A_{BET} , м ² /г	V_{spdes} , см ³ /г	D_{spdes} , нм	$\rho^{нас}$, г/см ³
I	0,4211(1)	0,7468(3)	11	260	124	1,038	35	0,469
II	0,4210(5)	0,7464(2)	38	295	15,1	0,024	8	0,539
III a	0,4215(3)	0,7489(7)	18	1455	60,8	0,286	21	0,103
III b	0,4225(2)	0,7542(7)	12	115	41,3	0,173	19	0,068

оксида магния размеры первичных частиц t_1 были заметно меньшими, что может быть связано как с выделением газообразных продуктов во время термообработки и разложения прекурсоров при получении оксида магния методом осаждения и глицин-цитрат-нитратным методом, так и с более низкой температурой обработки полученных этими методами продуктов (550 °С).

На рис. 2 видно, что размеры вторичных частиц оксида магния сильно зависят от метода получения и варьируются в широком диапазоне, при этом наименьшие размеры преобладающей фракции вторичных частиц характерны для образца III b , полученного глицин-цитрат-нитратным методом при мольном соотношении углерода к азоту, равном 0,25. Этот порошок представлял собой белый воздушный порошок с очень низкой насыпной плотностью 0,068 г/см³.

Изотермы адсорбции–десорбции азота порошков MgO (рис. 3 a , b) относятся к четвертому типу изотерм, присущему мезопористым адсорбентам с размером пор $2 \leq D \leq 50$ нм. Форма петель капиллярно-конденсационного гистерезиса на изотермах в области полимолекулярной адсорбции указывает на то, что в образцах присутствуют поры, эквивалентные и цилиндрическим, и щелевидным мезопорам одновременно. Первые образованы, по всей вероятности, консолидированными в агломераты кристаллитами, а вторые – внутриагломератные – пластинчатыми частицами, которые могут быть упакованы в своеобразные «пачки» и «ленты» (рис. 4).

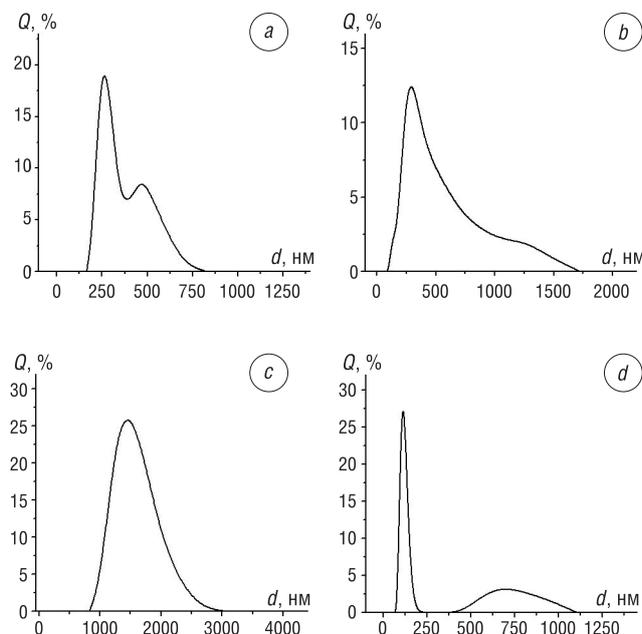


Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения по размерам частиц порошков оксида магния образцов I (a), II (b) и III a (c) и III b (d)

Fig. 2 Differential size distribution curves of magnesium oxide powders in the I (a), II (b), III a (c) and III b (d) samples

Кривые распределения пор по размерам порошков оксида магния на рис. 3 c , d доказывают гомогенность мезопор исследованных образцов, а величины среднего диаметра пор составляют 8–35 нм. Значения удельной поверхности исследованных образцов оксида магния в зависимости от условий осаждения варьируются в широком диапазоне 15,1–124 м²/г (таблица). Удельная поверхность и средний диаметр пор наноструктурированного порошка MgO, полученного после отжига образца I, составили 124 м²/г и 35 нм соответственно. Данный образец показал очень высокое значение удельного объема пор – 1,038 см³/г, что в 3,5–5 раз выше, чем для порошков, полученных в работах [2, 20].

На микрофотографиях порошков оксида магния, полученных методом распылительного пиролиза и глицин-цитрат-нитратным методом, можно рассмотреть агломерированные частицы от 120 до 260 нм

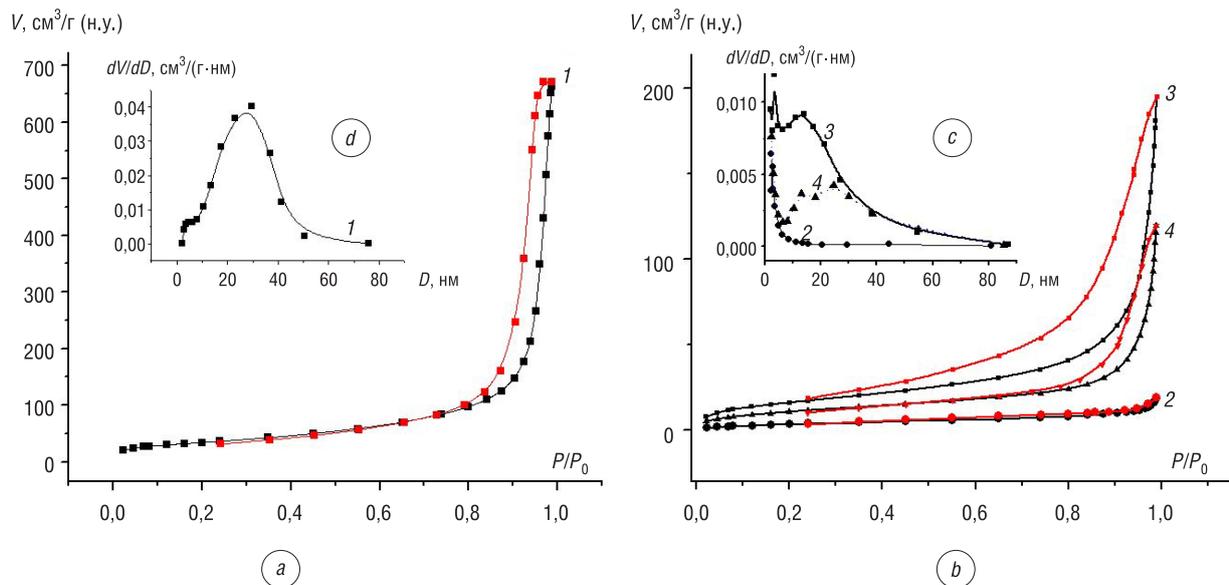


Рис. 3. Изотермы низкотемпературной адсорбции–десорбции азота (a, b) и дифференциальные кривые распределения мезопор по размерам в линейной форме (c, d) образцов оксида магния I (1), II (2), III a (3) и III б (4)
 Fig. 3. Isotherms of low-temperature adsorption-desorption of nitrogen (a, b) and the differential size distributions of mesopores in the linear form (c, d) of magnesium oxide samples I (1), II (2), III a (3) and III б (4)

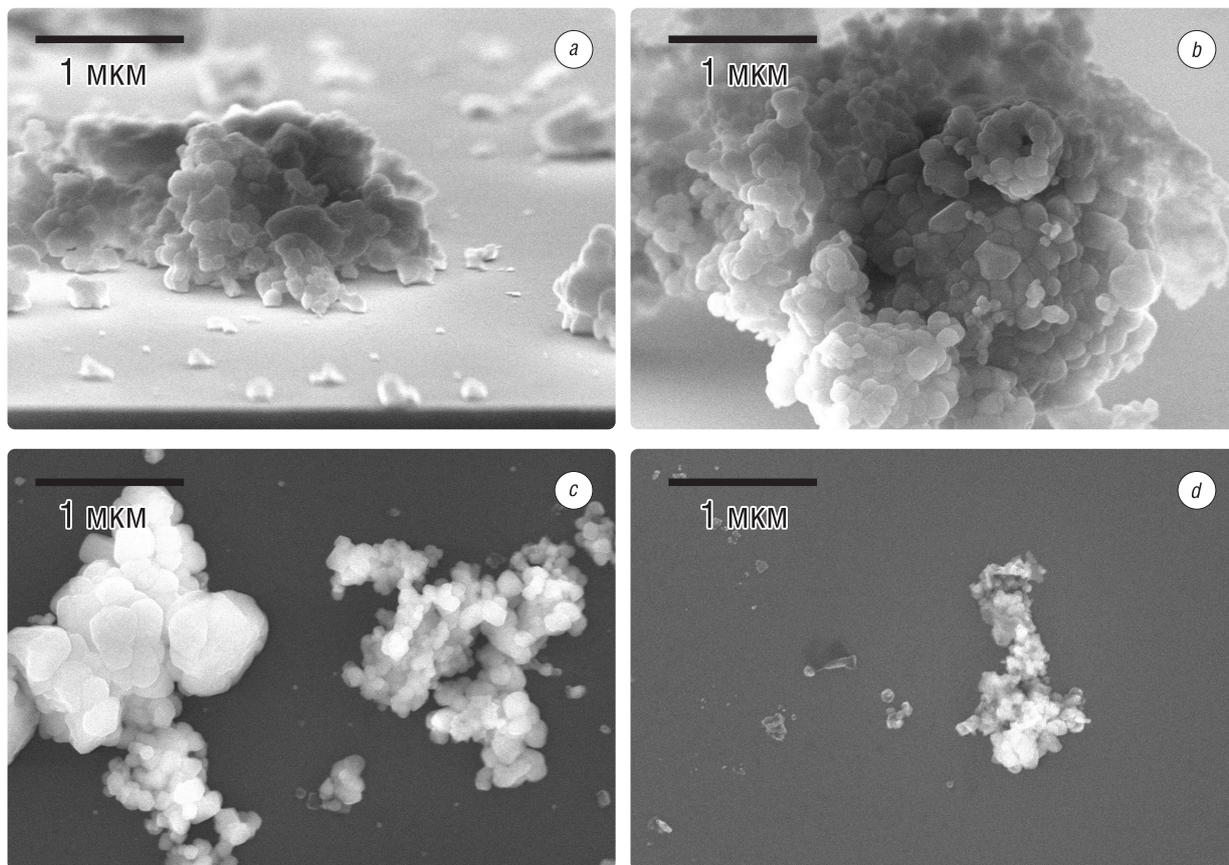


Рис. 4. Электронные микрофотографии оксида магния, полученного методом распылительного пиролиза (образец I) (a, c) и глицин-цитрат-нитратным методом (образец III б) (b, d)
 Fig. 4. SEM images of magnesium oxide produced by spray pyrolysis (sample I) (a, c) and glycine-citrate-nitrate method (sample III б) (b, d)

(рис. 4 *a, b*) и отдельные кристаллиты от примерно 40 нм (рис. 4, *c, d*). Сравнивая микрофотографии *a* и *b* (рис. 4), можно заметить, что размеры агломератов образца III *b* несколько больше размеров, характерных для образца II, что может быть связано с большей реакционной способностью наименьших кристаллитов (11 нм) порошка оксида магния, полученного глицин-цитрат-нитратным методом. В то же время последний образец представлен частицами со средними размерами 90–130 нм, что хорошо согласуется с результатами исследования гранулометрического состава этого порошка (таблица, рис. 2).

Заключение. В работе методом осаждения, методом распылительного пиролиза и глицин-цитрат-нитратным методом синтезированы мезопористые порошки оксида магния с контролируемой структурой агрегации частиц, изучена их кристаллическая структура, микроструктура, гранулометрический состав и адсорбционные свойства. Порошок MgO, полученный методом осаждения, показал высокие значения общего объема пор и удельной поверхности – 1,038 см³/г и 124,4 м²/г соответственно. Установлена зависимость характера горения на воздухе смеси карамелизованного геля нитрата магния с глицином и лимонной кислотой от соотношения компонентов, которая показала, что при мольном соотношении углерода к азоту (C/N), равном 0,25, фронт горения распространяется наиболее быстро, а полученный при таких условиях порошок оксида магния характеризуется наименьшим размером преобладающей фракции вторичных частиц – 115 нм.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Химические технологии и материалы» (подпрограмма «Новые химические технологии и продукты», задание 1.33).

Acknowledgements. This work has been performed with a support of State research program “Chemical technologies and materials” (subprogram “New chemical technologies and products”, task 1.33).

Список использованных источников

1. Umar, A. Metal Oxide Nanostructures and their Applications / A. Umar, Y.B. Hahn. – USA : American Scientific Publishers, 2010. – 693 p.
2. Jun, Ch. Catalytic performance of MgO with different exposed crystal facets towards the ozonation of 4-chlorophenol / Ch. Jun, T. Shuanghong, L. Jiang, X. Ya // Applied Catalysis A: General. – 2015. – Vol. 506. – P. 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.09.001>
3. Comparative study of microwave and conventional methods for the preparation and optical properties of novel MgO-micro and nano-structures / N. C. S. Selvama [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Vol. 509. – P. 9809–9815. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.08.032>
4. Сорбционные свойства наноструктурированного порошка MgO, полученного из модельного бишофита / И. В. Мацукевич [и др.] // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2017. – №2(33). – С. 118–124.
5. Synthesis and comparison of the photocatalytic activities of flame spray pyrolysis and sol-gel derived magnesium oxide nano-scale particles / S. Demirci [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2015. – Vol. 34. – P. 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.02.029>
6. Synthesis and characterization of porous magnesium and oxide nanoplates / J. C. Yu [et al.] // Journal of Physical Chemistry B. – 2004. – Vol. 108. – P. 64–70. <https://doi.org/10.1021/jp035340w>
7. Faghihi-Sani, M. A. Oxidation kinetics of MgO-C refractory bricks / M. A. Faghihi-Sani, A. Yamaguchi // Ceram. Int. – 2002. – Vol. 28. – P. 835–839. [https://doi.org/10.1016/s0272-8842\(02\)00049-4](https://doi.org/10.1016/s0272-8842(02)00049-4)
8. Паньков, В. В. Применение метода распылительного пиролиза для получения функциональных материалов / В. В. Паньков // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 2. Химия. Биология. География. – 2007. – №2. – С. 3–13.
9. Preparation of NiO-CuO-MgO fine powders by ultrasonic spray pyrolysis for carbon nanofibers synthesis / I. V. Krasnikova [et al.] // Chemical Physics Letters. – 2017. – Vol. 684. – P. 36–38. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.06.036>
10. Pradita, T. Synthesis of MgO Powder from Magnesium Nitrate Using Spray Pyrolysis / T. Pradita, S. J. Shih, B. V. Aji, Sudibyo // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1823. – Iss. 1. – Id.020016. <https://doi.org/10.1063/1.4978089>
11. Aerosol-spray diverse mesoporous metal oxide from metal nitrates / L. Kuai [et al.] // Scientific reports. – 2015. – Vol. 5. – Id. 9923. <https://doi.org/10.1038/srep09923>
12. Альмяшева, О. В. Роль предзародышевых образований в управлении синтезом нанокристаллических порошков CoFe₂O₄ / О. В. Альмяшева, В. В. Гусаров // Журн. прикл. химии. – 2016. – Т. 89, №6. – С. 689–695.
13. Banerjee, S., Sujatha Devi P. Sinter-active nanocrystalline CeO₂ powder prepared by a mixed fuel process: Effect of fuel on particle agglomeration / S. Banerjee, P. Sujatha Devi // Journal of Nanoparticle Research. – 2007. – Vol. 9. – Iss. 6. – P. 1097–1107. <https://doi.org/10.1007/s11051-006-9204-4>
14. Nanocomposite ceramics based on Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95} and MgO / V. Vashook [et al.] // Solid State Ionics. – 2016. – Vol. 288. – P. 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.01.033>
15. Ремпель, А. А. Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов / А. А. Ремпель // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, №5. – С. 474–500.

16. Dhaouadi, H. Mg(OH)₂ Nanorods synthesized by a facile hydrothermal method in the presence of CTAB / H. Dhaouadi, H. Chaabane, F. Touati // *Nano-Micro Lett.* – 2011. – Vol. 3, N 3. – P. 153–159. <https://doi.org/10.1007/bf03353666>
17. Nanoscale magnesium hydroxide and magnesium oxide powders: control over size, shape, and structure via hydrothermal synthesis / Y. Ding [et al.] // *Chem. Mater.* – 2001. – Vol. 13(2). – P. 435–440 <https://doi.org/10.1021/cm000607e>
18. Magnetic properties of synthetic Ni₃Si₂O₅(OH)₄ nanotubes / A. A. Krasilin [et al.] // *Europhysics Letters.* – 2016. – Vol. 113, N 4. – P. 47006–47011. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/113/47006>
19. Powder Diffraction File. Swarthmore: Joint Committee on Powder Diffraction Standard: Card №01-087-0653.
20. Synthesizing nanocrystal-assembled mesoporous magnesium oxide using cotton fibres as exotemplate / R.-Q. Sun [et al.] // *Microporous and Mesoporous Materials.* – 2008. – Vol. 111. – P. 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.08.006>

References

1. Umar A., Hahn Y. B. *Metal Oxide Nanostructures and their Applications*. USA, American Scientific Publishers, 2010. 693 p.
2. Jun Ch., Shuanghong T., Jiang L., Ya X. Catalytic performance of MgO with different exposed crystal facets towards the ozonation of 4-chlorophenol. *Applied Catalysis A: General*, 2015, vol. 506, pp. 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.09.001>
3. Selvama N. C. S., Kumara R. T., Kennedy L. J., Vijaya J. J. Comparative study of microwave and conventional methods for the preparation and optical properties of novel MgO-micro and nano-structures. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, pp. 9809 – 9815. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.08.032>
4. Matsukevich I. V., Shevchuk V. V., Polhovskya O. V., Matrunchik J. V., Vashook V. V. Sorption properties of the nanostructured powder of MgO produced from bischofite. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Vitebsk State Technological University*, 2017, no. 2(33), pp. 118–124 (in Russian).
5. Demirci S., Öztürk B., Yildirim S., Bakal F., Erol M., Sancakoğlu O., Yigit R., Celik E., Batar T. Synthesis and comparison of the photocatalytic activities of flame spray pyrolysis and sol–gel derived magnesium oxide nano-scale particles. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, vol. 34, pp. 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.02.029>
6. Yu J.C., Xu A., Zhang L., Song R., Wu L. Synthesis and characterization of porous magnesium and oxide nanoplates. *Journal of Physical Chemistry B*, 2004, vol. 108, pp. 64–70. <https://doi.org/10.1021/jp035340w>
7. Faghihi-Sani M. A., Yamaguchi A. Oxidation kinetics of MgO-C refractory bricks. *Ceramics International*, 2002, vol. 28, pp. 835–839. [https://doi.org/10.1016/s0272-8842\(02\)00049-4](https://doi.org/10.1016/s0272-8842(02)00049-4)
8. Pankov V. V. Application of the method of spray pyrolysis for the production of functional materials. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya = Vestnik BGU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography*, 2007, vol. 2, no. 2, pp. 3–13 (in Russian).
9. Krasnikova I. V., Mishakov I. V., Bauman Y. I., Karnaukhov T. M., Vedyagin A. A. Preparation of NiO-CuO-MgO fine powders by ultrasonic spray pyrolysis for carbon nanofibers synthesis. *Chemical Physics Letters*, 2017, vol. 684, pp. 36–38. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.06.036>
10. Pradita T., Shih S.J., Aji B. B., Sudibyo, Synthesis of MgO Powder from Magnesium Nitrate Using Spray Pyrolysis. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1823, no. 1, id.020016. <https://doi.org/10.1063/1.4978089>
11. Kuai L., Wang J., Ming T., Fang C., Sun Zh., Geng B., Wang J. Aerosol-spray diverse mesoporous metal oxide from metal nitrates. *Scientific reports*, 2015, vol. 5, id. 9923. <https://doi.org/10.1038/srep09923>
12. Almjasheva O. V., Gusarov V. V. Prenucleation Formations in Control over Synthesis of CoFe₂O₄ Nanocrystalline Powders. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2016, vol. 89, no. 6, pp. 851–856. <https://doi.org/10.1134/s107042721606001x>
13. Banerjee S., Sujatha Devi P. Sinter-active nanocrystalline CeO₂ powder prepared by a mixed fuel process: Effect of fuel on particle agglomeration. *Journal of Nanoparticle Research*, 2007, vol. 9, iss. 6., pp. 1097–1107. <https://doi.org/10.1007/s11051-006-9204-4>
14. Vashook V., Zosel J., Sperling E., Guth U., Mertig M., Ahlborn K., Gerlach F., Fichtner W., Scheltera M. Nanocomposite ceramics based on Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95} and MgO. *Solid State Ionics*, 2016, vol. 288, pp. 98–102. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2016.01.033>
15. Rempel A. A. Nanotechnologies. Properties and application of nanostructured materials. *Russian Chemical Reviews*, 2007, vol. 76, no. 5, pp. 435–461. <https://doi.org/10.1070/RC2007v076n05ABEH003674>
16. Dhaouadi H., Chaabane H., Touati F. Mg(OH)₂ Nanorods synthesized by a facile hydrothermal method in the presence of CTAB. *Nano-Micro Letters*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 153–159. <https://doi.org/10.1007/bf03353666>
17. Ding Y., Zhang G., Wu H., Hai B., Wang L., Qian Y. Nanoscale magnesium hydroxide and magnesium oxide powders: control over size, shape, and structure via hydrothermal synthesis. *Chemistry of Materials*, 2001, vol. 13(2), pp. 435–440. <https://doi.org/10.1021/cm000607e>
18. Krasilin A. A., Semenova A. S., Kellerman D. G., Nevedomsky V. N., Gusarov V. V. Magnetic properties of synthetic Ni₃Si₂O₅(OH)₄ nanotubes. *Europhysics Letters*, 2016, vol. 113, no.4, pp.47006–47011. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/113/47006>
19. Powder Diffraction File. Swarthmore: Joint Committee on Powder Diffraction Standard: Card № 01-087-0653.
20. Sun R.-Q., Sun L.-B., Chun Y., Xu Q.-H., Wu H. Synthesizing nanocrystal-assembled mesoporous magnesium oxide using cotton fibres as exotemplate. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008, vol. 111, pp. 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.08.006>

Информация об авторах

Мацукевич Ирина Васильевна – канд. хим. наук, зав. лаб. магниевых соединений, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irinavas.k1975@gmail.com

Крутько Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, профессор, зав. отделом композиционных материалов, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Овseenко Людмила Васильевна – канд. хим. наук, зам. директора по науч. и инновац. работе, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ovseenko@igic.bas-net.by

Полховская Ольга Васильевна – лаборант, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: polhovskyaolga@mail.ru

Губицкий Дмитрий Владимирович – мл. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: timwer23@yandex.com

Вашук Владимир Васильевич – д-р хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vladimir_vashook@yahoo.com

Information about the authors

Irina V. Matsukevich – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory of the Magnesium Compounds, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irinavas.k1975@gmail.com

Nikolay P. Krutko – Academician, D. Sc. (Chemistry), Head of the Department of Composite Material, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Ludmila V. Ovseenko – Ph. D. (Chemistry), Deputy Director for Science and Innovation, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ovseenko@igic.bas-net.by

Olga V. Polhovskya – Laboratory Assistant, Laboratory of the Magnesium Compounds, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: polhovskyaolga@mail.ru

Dmitry V. Hubitski – Junior researcher, Laboratory of the Magnesium Compounds, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: timwer23@yandex.com

Vladimir V. Vashook – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vladimir_vashook@yahoo.com