

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.3.12

УДК 661.846.22

**В.З. Пойлов, А.Л. Казанцев, С.А. Смирнов**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ  
ОКСИДА МАГНИЯ ПРИ ТЕРМОГИДРОЛИЗЕ  
РАСТВОРОВ ХЛОРИДА МАГНИЯ**

*Оксид магния является одним из веществ, широко используемых в производстве керамики, огнеупоров, цементов, катализаторов, огнезащитных покрытий. Качество оксида магния в основном определяется химическим и дисперсным составами, зависящими от технологии получения.*

*Способ химического осаждения, как наиболее распространенный метод получения высокодисперсного оксида магния, характеризуется четкой управляемостью процесса, но обладает некоторыми недостатками: многостадийностью и трудоемкостью стадии отделения осадка от жидкой фазы. Золь-гель технология позволяет получить оксид магния с размером частиц 5–100 нм, но высокая стоимость реагентов, длительность протекания процесса, трудоемкость стадии отделения осадка от жидкой фазы и многостадийность делают этот способ дорогостоящим.*

*Метод термического гидролиза солей магния позволяет избавиться от стадии отделения ультрадисперсных частиц от жидкой фазы и таким образом интенсифицировать и удешевить процесс получения готового продукта – оксида магния. И, несмотря на промышленную реализацию этой технологии, закономерности формирования частиц оксида магния остаются мало изученными. Знание такой информации позволяет лучше управлять процессом термогидролиза для получения продукта с заданными характеристиками. В связи с этим целью работы было выявление особенностей получения частиц оксида магния методом термического гидролиза растворов хлорида магния.*

*С использованием метода термического анализа установлено, что при различных скоростях нагрева образца гексагидрата хлорида магния отщепление воды при термогидролизе происходит по различным схемам. Показано, что термогидролиз гексагидрата хлорида магния протекает через стадию формирования кристаллов различных размеров, с последующим их разложением и формированием аморфных частиц оксида магния чешуйчатой формы.*

*Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что термогидролиз концентрированного раствора хлорида магния с органическим растворителем на платиновой подложке в отдельной капле и в тонких пленках прекурсора сопровождается образованием наночастиц размером 50–60 нм. Показана эволюция частиц, формируемых при термогидролизе хлорида магния в потоке продуктов горения смеси водорода с воздухом.*

**Ключевые слова:** хлорид магния, оксид магния, получение, термогидролиз, наночастицы.

**V.Z. Poilov, A.L. Kazantsev, S.A. Smirnov**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

## **FEATURES FORMATION MAGNESIUM OXIDE PARTICLES DURING THERMOHYDROLYSIS OF MAGNESIUM CHLORIDE SOLUTIONS**

*Magnesium oxide is one of the substances widely used in the production of ceramics, refractories, cements, catalysts, and fire retardant coatings. The quality of magnesium oxide is mainly determined by the chemical and dispersed compositions, depending on the production technology.*

*The method of chemical deposition, as the most common method for obtaining highly dispersed magnesium oxide, is characterized by a high controllability of the process, but has some disadvantages: the multistage and laboriousness of the stage of separating the precipitate from the liquid phase. The sol-gel technology makes it possible to obtain magnesium oxide with a particle size of 5-100 nm, but the high cost of reagents, the duration of the process, the laboriousness of the stage of separating the precipitate from the liquid phase and the multistage nature make this method expensive.*

*The method of thermal hydrolysis of magnesium salts allows you to get rid of the stage of separating ultrafine particles from the liquid phase and thus intensify and reduce the cost of the process of obtaining the finished product – magnesium oxide. And, despite the industrial implementation of this technology, the laws governing the formation of magnesium oxide particles remain poorly understood. Knowledge of such information allows better control of the thermohydrolysis process to obtain a product with specified characteristics. In this regard, the aim of the work was to identify the features of obtaining magnesium oxide particles by thermal hydrolysis of magnesium chloride solutions.*

*Using the method of thermal analysis, it was found that at different heating rates of a sample of magnesium chloride hexahydrate, the elimination of water during thermohydrolysis occurs according to different schemes. It is shown that thermohydrolysis of crystallized magnesium chloride proceeds through the stage of formation of crystals of various sizes, followed by their decomposition and the formation of amorphous particles of magnesium oxide of a flaky shape.*

*It was found by scanning electron microscopy that thermohydrolysis of a concentrated solution of magnesium chloride with an organic solvent on a platinum substrate in a separate drop and in thin films of the precursor, accompanied by the formation of nanoparticles 50-60 nm in size. The evolution of particles formed during the thermohydrolysis of magnesium chloride in the flow of combustion products of a mixture of hydrogen and air is shown.*

**Keywords:** *magnesium chloride, magnesium oxide, production, thermohydrolysis, nanoparticles.*

Оксид магния является одним из веществ, широко используемых в производстве керамики, огнеупоров, цементов, катализаторов, огнезащитных покрытий, антибактериальных средств [1–13]. Качество ок-

сида магния в основном определяется химическим и дисперсным составами, зависящими от технологии получения.

Технология химического осаждения [1–5] из растворов неорганических солей магния включает в себя выделение промежуточного продукта – гидроксида или карбоната магния, промывку, сушку и последующую прокалку осадка с образованием оксида магния. Способ химического осаждения – наиболее распространенный метод получения высокодисперсного оксида магния, что объясняется доступностью сырья, возможностью управления процессом для получения продукта с заданными свойствами. Полученный этим способом продукт представляет собой частицы диаметром 30–70 нм, с некоторой долей агрегатов. Основные его недостатки: многостадийность и трудоемкость стадии отделения осадка от жидкой фазы.

Золь-гель технология [6] позволяет путем гидролиза растворов алкоксидов и последующей сушки в сверхкритических условиях получить оксид магния с размером частиц 5–100 нм. Однако высокая стоимость реагентов, длительность протекания процесса, трудоемкость стадии отделения осадка от жидкой фазы и многостадийность делают этот способ дорогостоящим.

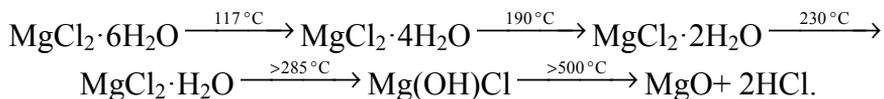
Метод термического гидролиза солей магния путем сжигания в пламени относится [7–13] к высокопроизводительным способам и лишен одного из главных недостатков – проблемы отделения ультрадисперсных частиц от жидкой фазы, поскольку стадия образования частиц MgO производится в среде газов и паров. Несмотря на промышленную реализацию в США, Германии, Израиле, Франции, Австрии [14] технологии термогидролиза хлорида магния с получением порошкового технического оксида магния, закономерности формирования частиц оксида магния мало изучены. Знание такой информации позволяет лучше управлять процессом термогидролиза для получения продукта с заданными характеристиками. В связи с этим целью работы было выявление особенностей получения частиц оксида магния методом термического гидролиза растворов хлорида магния.

В процессе термического разложения раствора хлорида магния протекают следующие стадии [14–17]:

- испарение раствора  $MgCl_2$  и кристаллизация микрокристаллов гексагидрата хлорида магния  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ;
- термическая дегидратация  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  с образованием частиц кристаллогидратов  $MgCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $MgCl_2 \cdot 2H_2O$ ,  $MgCl_2 \cdot H_2O$ , паров воды;

• термическое разложение MgCl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O с образованием частиц промежуточных продуктов термогидролиза Mg(OH)<sub>x</sub>Cl<sub>y</sub> и частиц оксида магния, хлористого водорода и паров воды.

Согласно данным [14], процесс термического разложения раствора хлорида магния сопровождается образованием гексагидрата хлорида магния MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O и его последующего разложения по схеме



В работе [15] проведен термический анализ одновременно с измерением электропроводности образца гексагидрата хлорида магния. Установлено, что при скорости нагрева образца 6 град/мин в закрытом тигле плавление MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O протекает при меньших температурах 98–104 °С. Эндоеффекты отщепления первых двух молей воды наблюдаются при 160–168 °С, вторых двух молей воды – при 183 °С, пятого и шестого молей H<sub>2</sub>O – соответственно при 223 и 273 °С. При этом к моменту начала отщепления 5-й молекулы воды в образце отсутствует жидкая фаза [15], и образование гидроксохлорида магния протекает за счет взаимодействия ионов магния с остатками кристаллогидратной воды. При температуре 436 °С происходит плавление, а при температуре 483 °С – разложение гидроксохлорида магния.

В связи с противоречивым характером сведений о процессе термического разложения MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O нами проведены исследования этого процесса при скорости нагрева образца 10 и 3 град/мин. Закономерности протекания процесса термического разложения MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O изучали методом дифференциально-термического анализа (ДТА) в среде Ar на приборе STA449 марки Jupiter немецкой фирмы Netzsch. Масса навески исследуемого образца составляла 37 и 14 мг, нагрев производили на интервале температур 40–1000 °С.

Термограмма образца MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, полученная при скорости нагрева 10°С образца массой 37 мг, представлена на рис. 1. На кривой ДСК имеется шесть эндотермических эффектов. Первый эндоеффект (при T = 132 °С) соответствует плавлению MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O с отщеплением 0,308 H<sub>2</sub>O, второй эффект (при T = 212,6 °С) согласно изменению массы характеризует отщепление 3,03 моль воды, третий эндоеффект (246,1 °С) соответствует отщеплению 1,55 моль воды, четвертый (291,1 °С) – отщеплению 1,18 моль воды. Эндоеффект при 477,7 °С соответствует процессу плавления и разложения продуктов гидролиза

хлорида магния и образованию безводного хлорида магния  $MgCl_2$ . Разложение гидроксохлорида магния сопровождается изменением массы 6,56 % и заканчивается при 633,2 °С. Эндозффект при температуре 718,7 °С соответствует началу плавления безводного  $MgCl_2$ .

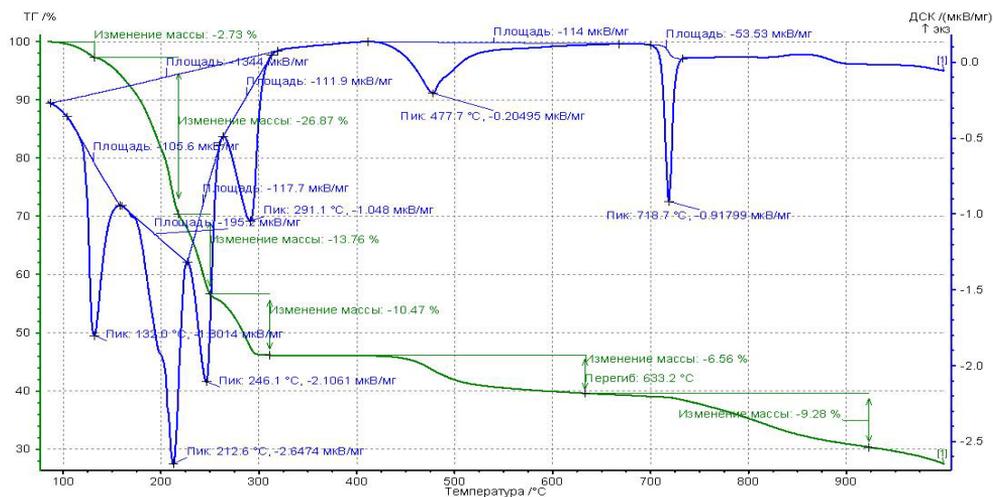


Рис. 1. Кривые ДСК и ТГ гексагидрата хлорида магния

При скорости нагрева образца 3 град/мин в закрытом тигле эндозффект отщепления первых двух молей воды наблюдается при 118,3 °С, эффект отщепления вторых двух молей  $H_2O$  – при 163,7 °С, эффект удаления пятого моля воды – при 193,7 °С.

Из анализа полученных данных можно заключить, что механизм и температуры процесса термического разложения хлорида магния в значительной степени зависят от скорости нагревания и массы образца. При низких скоростях нагревания и более высокой массе образца отщепление воды происходит по схеме  $MgCl_2 \cdot 6H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 4H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 2H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot H_2O \rightarrow MgCl_2(1-X)H_2O$ , где  $X$  – доля молей воды, участвующих в гидролизе хлорида магния. При высоких скоростях нагревания и малой массе образца отщепление воды происходит по схеме:  $MgCl_2 \cdot 6H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 2,7H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 1,15H_2O \rightarrow MgCl_2(1-X)H_2O$ . Вероятной причиной такого поведения является то, что при низкой скорости нагрева и большей массе образца пары воды, удаляемые из нижних слоев  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ , обводняют средние и верхние слои пробы, в результате чего эти слои подплавляются и десорбция воды происходит медленно. При высокой же скорости нагревания (10 град/мин) и малой массе пробы (14 мг) удаление паров воды происходит с по-

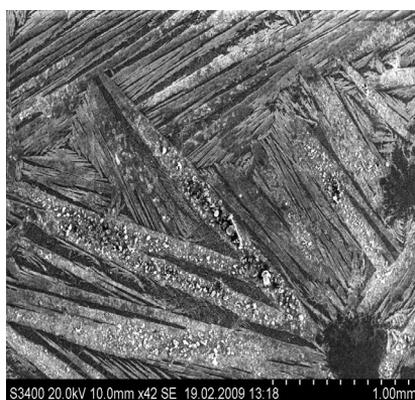
верхности кристаллов MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O с большей скоростью и по другому механизму.

Изучение процесса образования микрокристаллов гексагидрата хлорида магния проводили путем распыления раствора хлорида магния в слой ацетона с последующим испарением ацетона и кристаллизацией MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O на поверхности платиновой подложки в виде капли или тонкого слоя. Затем проводили термическую обработку полученных кристаллов, нагревая пламенем подложку снизу. Морфологию получаемых частиц изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) S-3400N фирмы Hitachi, а элементный состав – с помощью энергодисперсионной приставки фирмы Bruker, позволяющей проводить рентгеноспектральный анализ.

В результате термического разложения наблюдалось образование плоских микрокристаллов MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O саблеобразной формы различных размеров. На рис. 2, а, б можно видеть, что в процессе термообработки кристаллы гексагидрата хлорида магния разлагаются с образованием аморфных частиц оксида магния чешуйчатой формы.

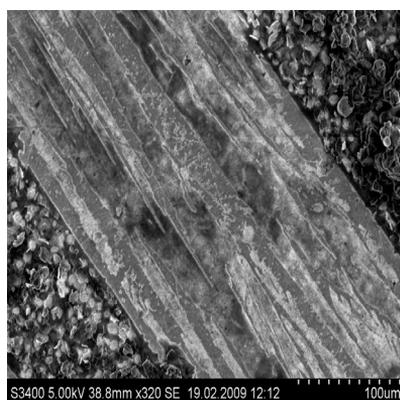
При большом увеличении чешуйчатых частиц заметна пористая структура оксида магния (рис. 2, в), содержащего наночастицы с размерами около 50 нм. Анализ содержания иона хлора в осадке продукта термогидролиза показал, что в частично разложившихся микрокристаллах гексагидрата хлорида магния содержание хлора составляет от 10 до 24 % по массе, а в чешуйчатых частицах MgO практически отсутствует. Это указывает на то, что процесс термогидролиза прошел полностью. Установлено, что снижение толщины пленки прекурсора способствует снижению содержания хлора в продукте, т.е. повышает степень термогидролиза.

Изучение особенностей образования частиц ультрадисперсного оксида магния проводили путем распыления в органическом растворителе с последующим нагреванием на платиновой подложке в струе газа, образованной при горении водородно-кислородной смеси газов при температуре ~3000 °С. Источником кислородно-водородной смеси являлся электролитический газогенератор марки «Электрогаз ЭГ-80». При этом в образце происходило одновременное сгорание органического реагента, испарение воды, содержащейся в растворе, и процесс термического разложения хлорида магния. В газовую фазу выделялись HCl, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, а в твердую фазу – оксид магния с небольшой примесью углерода.



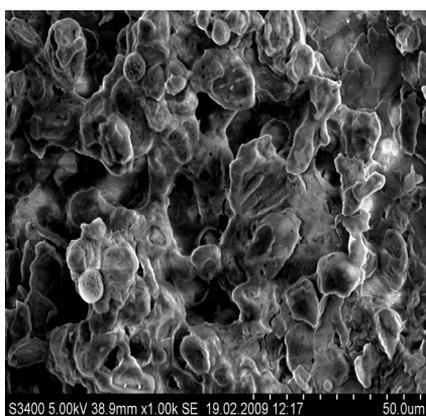
Увеличение 42X

*a*



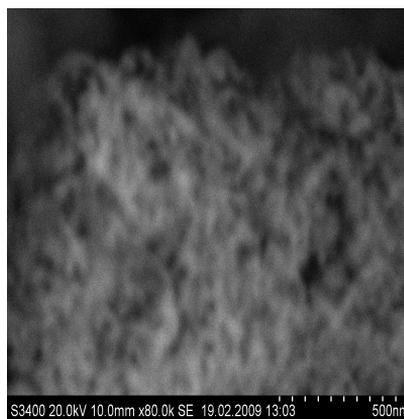
Увеличение 320X

*б*



Увеличение 1000X

*в*



Увеличение 80 000X

*з*

Рис. 2. Микрофотографии СЭМ: *a* – микрокристаллы  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; *б* – частично разложившиеся микрокристаллы  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ; *в*, *з* – аморфные микрочастицы  $\text{MgO}$ , полученные на подложке

Фотографии эволюции процесса формирования частиц продукта термогидролиза хлорида магния приведены на рис. 3.

На начальном этапе протекания процесса термогидролиза хлорида магния при низких температурах  $T < 300\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3, *a*) частицы имеют шаровидную форму (радиусом 20 мкм), оболочка которой сформирована из большого количества агрегированных микрочастиц овальной формы (размерами 2–3 мкм). При более высокой температуре  $T > 478\text{ }^\circ\text{C}$  шаровидные частицы разрываются от внутреннего давления газообразных продуктов термогидролиза – паров воды и хлористого водорода (рис. 3, *в*), формируя впоследствии при  $T > 633\text{ }^\circ\text{C}$  частицы  $\text{MgO}$  осколочной формы (рис. 3, *з*).

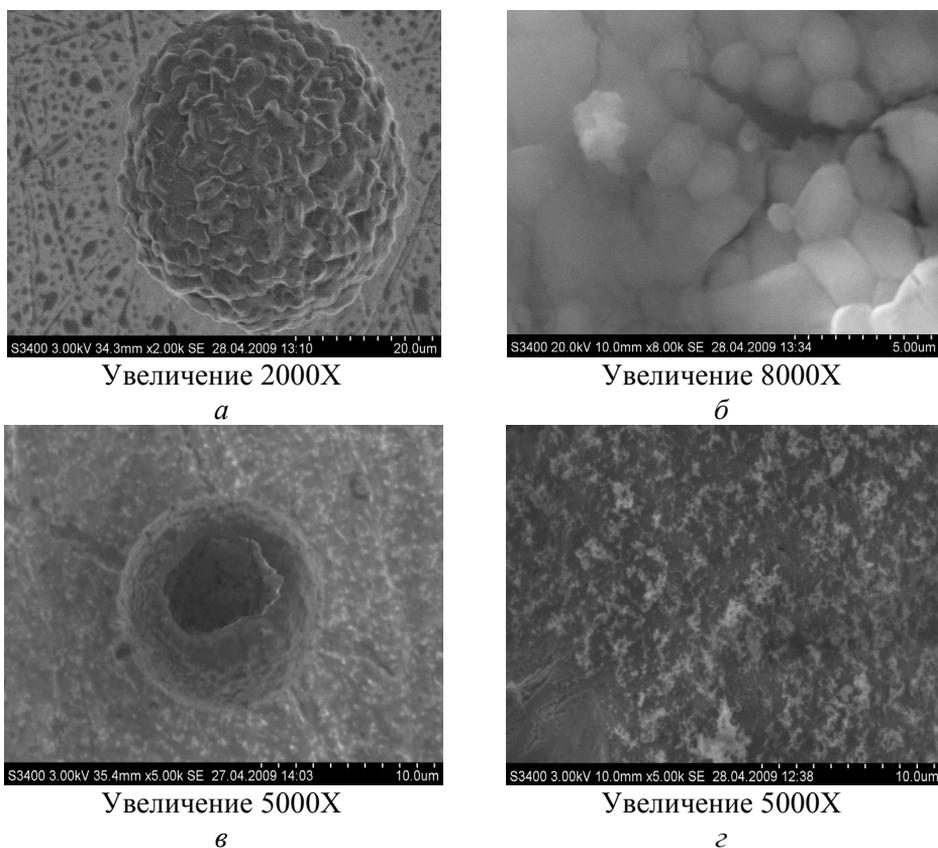


Рис. 3. Эволюция формирования частиц оксида магния при термогидролизе хлорида магния в потоке продуктов сгорания смеси водорода и воздуха: *a* – формирование шаровидных частиц продуктов низкотемпературного термогидролиза; *б* – поверхность шаровидных частиц; *в* – разрыв частиц при повышенных температурах; *г* – образование осколочных частиц MgO при высоких температурах

### Выводы:

1. С использованием метода термического анализа установлено, что при низких скоростях нагрева образца гексагидрата хлорида магния отщепление воды при термогидролизе происходит по схеме  $MgCl_2 \cdot 6H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 4H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 2H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot H_2O \rightarrow MgCl_2(1-X)H_2O$ , а при высоких скоростях нагрева – по схеме  $MgCl_2 \cdot 6H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 2,7H_2O \rightarrow MgCl_2 \cdot 1,15H_2O \rightarrow MgCl_2(1-X)H_2O$ , где  $X$  – доля молей воды, участвующих в гидролизе хлорида магния.

2. Показано, что термогидролиз кристаллизованного гексагидрата хлорида магния протекает через стадию формирования плоских кри-

сталлов различных размеров, с последующим их разложением и формированием аморфных частиц оксида магния чешуйчатой формы.

3. Проведен термогидролиз концентрированного раствора хлорида магния с органическим растворителем на платиновой подложке в отдельной капле и в тонких пленках прекурсора. Установлено, что термогидролиз сопровождается образованием наночастиц размером 50–60 нм и агрегатов частиц, при этом предварительная диспергация гидролизуемого прекурсора (в виде капель или пленок) способствует снижению содержания хлора в продукте, т.е. повышает степень термогидролиза.

4. Установлена эволюция формируемых частиц при термогидролизе хлорида магния в потоке продуктов горения смеси водорода с воздухом, сопровождающаяся формированием на первых этапах низкотемпературного термогидролиза шаровидных частиц, которые при повышении температуры разрываются с образованием осколочных частиц оксида магния.

*Исследования проведены по проекту Министерства науки и образования РФ RFMEFI62120X0038 от 27 апреля 2020 г. № 075-15-2020-532 с использованием научного оборудования «Центра наукоемких химических технологий и физико-химических исследований Пермского национального исследовательского политехнического университета.*

### **Список литературы**

1. Effect of deposition conditions on properties of nanostructured magnesium hydroxide powders / I. Matsukevich, A. Ruchets, N. Krutko, V.V. Vashuk, T. Kuznetsova // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2017. – Vol. 90. – P. 1–6.

2. Nanoscale magnesium hydroxide and magnesium oxide powders: Control over size, shape and structure via hydrothermal synthesis / Y. Ding, G. Zhang, H. Wu, B. Hai, Wang, Y. Qian // Chemistry of Materials. – 2001. – Vol. 3. – P. 435–440.

3. Zeyneb Camtakan, Sema Erenturk, Sabriye Magnesium Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Uranium Sorption Properties. – Published online 15 July 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/ep.10575

4. Mohammad Moslem Imani, Mohsen Safaei. Optimized Synthesis of Magnesium Oxide Nanoparticles as Bactericidal Agents // Hindawi Journal of Nanotechnology. – 2019. – Vol. 2019. – 6 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6063832>

5. Meshkani F., Rezaei M. Facile Synthesis of Nanocrystalline Magnesium Oxide with High Surface Area // Powder Technology. – 2009. – № 196. – P. 85–88.

6. Synthesis of Magnesium Oxide Nanoplates and Their Application in Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide Adsorption / Thi Hai Yen Duong, Thanh Nhan Nguyen, Ho Thi Oanh, Tuyet Anh Dang Thi, Le Nhat Thuy Giang, Hoang Thi Phuong, Nguyen Tuan Anh, Ba Manh Nguyen, Vinh Tran Quang, Giang Truong Le, Tuyen Van Nguyen // *Journal of Chemistry*. – 2019. – Vol. 2019. – 9 p. <https://doi.org/10.1155/2019/4376429>

7. Balamurugan S., Ashna L., Parthiban P. Synthesis of Nanocrystalline MgO Particles by Combustion Followed by Annealing Method Using Hexamine as a Fuel // *Journal of Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 2014. – 6 p. <https://doi.org/10.1155/2014/841803>

8. Kaviyarasu K., Devarajan P.A. A versatile route to synthesize MgO nanocrystals by combustion technique // *Der Pharma Chemica*. – 2011. – № 3 (5). – P. 248–254.

9. Maliyekkal S.M., Antony K.R., Pradeep T. High yield combustion synthesis of nanomagnesia and its application for fluoride removal // *Science of the Total Environment*. – 2010. – № 408. – P. 2273–2282.

10. Rao K.V., Sunandana C.S. Structure and microstructure of combustion synthesized MgO nanoparticles and nanocrystalline MgO thin films synthesized by solution growth route // *Journal of Materials Science*. – 2008. – № 43. – P. 146–154.

11. Mathews T., Subasri R., Sreedharan O.M. A rapid combustion synthesis of MgO stabilized Sr- and Ba- $\beta$ -alumina and their microwave sintering // *Solid State Ionics*. – 2002. – № 148. – P. 135–143.

12. Patent 101234751 CN. Method for preparing nano material by flame combustion. № 20081101361. 2011 / autors MINGYUAN GAO, NAN ZHAO. – Publ. 08.06.2008.

13. Черепанова Т.И., Муратова М.И. Окись магния и ее получение из магнийсодержащего сырья // *Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей: сб. науч. тр.* – СПб.: ЛИК, 2001. – Т. 2. – С. 217–224.

14. Здановский А.Б., Черемных Л.М. Физико-химические свойства галургических растворов и солей. Хлориды натрия, калия и магния: справ. – СПб.: Химия, 1997. – 512 с.

15. Влияние хлоридов натрия и калия на дегидратацию карналлита / В.З. Пойлов, Я. Эдерова, Л.В. Головченко, А. Блажек // *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*. – 1984. – Vol. 49. – P. 2763–2769.

16. Термогидролиз бишофита с получением нанодисперсного оксида магния / С.А. Смирнов, В.З. Пойлов, С.А. Лобанов, А.Л. Казанцев // *Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Химическая технология и биотехнология*. – 2009. – № 9. – С. 26–34.

17. Получение нанодисперсного оксида магния методом термического гидролиза водно-органических растворов хлорида магния / С.А. Смирнов, В.З. Пойлов, С.А. Лобанов, А.Л. Казанцев, С.В. Лановецкий // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – № 12. – С. 436–441.

## References

1. Matsukevich I., Ruchets A., Krutko N., Vashuk V.V., Kuznetsova T. Effect of deposition conditions on properties of nanostructured magnesium hydroxide powders. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2017, vol. 90, pp. 1-6.

2. 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. 3, pp. 435-440.

3. Zeyneb Camtakan, Sema Erenturk, Sabriye Magnesium Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Uranium Sorption Properties. Published online 15 July 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/ep.10575.

4. Mohammad Moslem Imani, Mohsen Safaei. Optimized Synthesis of Magnesium Oxide Nanoparticles as Bactericidal Agents. *Hindawi Journal of Nanotechnology*, 2019, Article ID 6063832, 6 pages <https://doi.org/10.1155/2019/6063832>

5. Meshkani F., Rezaei M., Facile Synthesis of Nanocrystalline Magnesium Oxide with High Surface Area. *Powder Technology*, 2009, vol. 196, no. 1, pp. 85-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2009.07.010>

6. Thi Hai Yen Duong, Thanh Nhan Nguyen, Ho Thi Oanh, Tuyet Anh Dang Thi, Le Nhat Thuy Giang, Hoang Thi Phuong, Nguyen Tuan Anh, Ba Manh Nguyen, Vinh Tran Quang, Giang Truong Le, Tuyen Van Nguyen. Synthesis of Magnesium Oxide Nanoplates and Their Application in Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide Adsorption. *Journal of Chemistry*, 2019, Article ID 4376429, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2019/4376429>

7. Balamurugan S., Ashna L., Parthiban P. Synthesis of Nanocrystalline MgO Particles by Combustion Followed by Annealing Method Using Hexamine as a Fuel. *Journal of Nanotechnology*, 2014, Article ID 841803, 6 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/841803>

8. Kaviyarasu K., Devarajan P.A. A versatile route to synthesize MgO nanocrystals by combustion technique. *Der Pharma Chemica*, 2011, vol. 3, no. 5, pp. 248-254.

9. Maliyekkal S. M., Antony K. R., Pradeep T. High yield combustion synthesis of nanomagnesia and its application for fluoride removal. *Science of the Total Environment*, 2010, vol. 408, no. 10, pp. 2273-2282.

10. Rao K.V., Sunandana C.S. Structure and microstructure of combustion synthesized MgO nanoparticles and nanocrystalline MgO thin films synthesized by solution growth route. *Journal of Materials Science*, 2008, vol. 43, no. 1, pp. 146-154.

11. Mathews T., Subasri R., Sreedharan O.M. A rapid combustion synthesis of MgO stabilized Sr- and Ba- $\beta$ -alumina and their microwave sintering. *Solid State Ionics*, 2002, vol. 148, no. 1-2, pp. 135-143.

12. Mingyuan Gao, Nan Zhao. Method for preparing nano material by flame combustion. Patent CN № 20081101361 (2011).

13. Cherepanova T.I., Muratova M.I. Okis' magnija i ee poluchenie iz magnijsoderzhashhego syr'ja [Magnesium oxide and its production from magnesium-containing raw materials]. *Sbornik nauchnyh trudov «Aktual'nye voprosy dobychi i pererabotki prirodnih solej»*. Tom 2 Saint Petersburg, LIK, 2001, pp. 217-224.

14. Zdanovskij A.B., Cheremnyh L.M. Fiziko-himicheskie svojstva galurgicheskikh rastvorov i solej. Hloridy natrija, kalija i magnija [Physicochemical properties of halurgic solutions and salts. Chlorides of sodium, potassium and magnesium]. Saint Petersburg, Himija, 1997, 512 p.

15. Poilov V.Z., Jederova Ja., Golovchenko L.V., Blazhek A. Vlijanie hloridov natrija i kalija na degidrataciju karnallita [Effect of sodium and potassium chlorides on carnallite dehydration]. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*, 1984, vol.49, pp. 2763-2769.

16. Smirnov S.A., Poilov V.Z., Lobanov S.A., Kazancev A.L. Termogidroliz bishofita s polucheniem nanodispersnogo oksida magnija [Thermohydrolysis of bischofite to obtain nanodispersed magnesium oxide]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2009, no 9, pp. 26–34.

17. Smirnov S.A., Poilov V.Z., Lobanov S.A., Kazancev A.L., Lanoveckij S.V. Poluchenie nanodispersnogo oksida magnija metodom termicheskogo gidroliza vodno-organicheskikh rastvorov hlorida magnija [Preparation of nanodispersed magnesium oxide by thermal hydrolysis of aqueous-organic solutions of magnesium chloride]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2010, no. 12, pp. 436-441.

Получено 01.08.2020

### **Об авторах**

**Пойлов Владимир Зотович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

**Казанцев Александр Леонидович** (Пермь, Россия) – инженер кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: itilamid@rambler.ru).

**Смирнов Сергей Александрович** (Пермь, Россия) – инженер кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: po4tamoia@mail.ru).

### **About the authors**

**Vladimir Z. Poilov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: vladimirpoilov@mail.ru).

**Aleksandr L. Kazantsev** (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: itilamid@rambler.ru).

**Sergey A. Smirnov** (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: po4tamoia@mail.ru).