

Научная статья
УДК 66.099.2, 546.05
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.023

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПОЛУЧЕНИЮ ИНГИБИТОРОВ ГОРЕНИЯ С ВЫСОКОЙ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ $Mg(OH)_2$

**Алена Игоревна Сабурова^{1✉}, Артем Шамсутдинов²,
Валерий Владимирович Замашчиков³, Игорь Викторович Вальцифер⁴**

^{1, 2, 4}*«Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук» — филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального
исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия*

³*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения
имени В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

¹*saburova.a@itcras.ru✉*

²*shamsutdinov.a@itcras.ru*

³*albor@kinetics.nsc.ru*

⁴*igor12381@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9135-2487>*

Аннотация

Данное исследование направлено на разработку эффективных ингибиторов горения с высокой охлаждающей способностью на основе гидроксида магния. Метод распылительной сушки позволил получить сферические гидрофобные частицы с улучшенной сыпучестью. Созданы супрачастицы с ядром из дигидрофосфата калия и оболочкой из гидроксида магния, обеспечивающие комплексный эффект подавления горения.

Ключевые слова:

ингибиторы горения, супрачастицы, ПАВ, гидроксид магния, гидротермальный синтез, распылительная сушка

Для цитирования:

Сабурова А. И., Шамсутдинов А. Ш., Замашчиков В. В., Вальцифер И. В. Новые подходы к получению ингибиторов горения с высокой охлаждающей способностью с использованием $Mg(OH)_2$ // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 122–126. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.023.

Original article

NEW APPROACHES TO THE PRODUCTION OF COMBUSTION INHIBITORS WITH HIGH COOLING CAPACITY USING $Mg(OH)_2$

Alena I Saburova^{1✉}, Artem Sh Shamsutdinov², Zamashchikov V Vladimirovich³, Igor V. Valtsifer⁴

^{1, 2, 4}*Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences — branch
of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural
Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

³*Federal State Budgetary Institution of Science V.V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

¹*saburova.a@itcras.ru✉*

²*shamsutdinov.a@itcras.ru*

³*albor@kinetics.nsc.ru*

⁴*igor12381@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9135-2487>*

Abstract

This study is aimed at developing effective combustion inhibitors with high cooling capacity based on magnesium hydroxide. The spray drying method made it possible to obtain spherical, hydrophobic particles with improved flowability. Supra particles with a core of potassium dihydrogen phosphate and a shell of magnesium hydroxide have been created, providing a dual fire extinguishing mechanism.

Keywords:

combustion inhibitors, supra particles, surfactants, magnesium hydroxide, hydrothermal synthesis, spray drying

For citation:

Saburova A. I., Shamsutdinov A. Sh., Zamashchikov V. V., Valtsifer I. V. New approaches to the production of combustion inhibitors with high cooling capacity using $Mg(OH)_2$ // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences. 2025. Vol. 16, No. 4. pp. 122–126. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.023.

Наиболее распространенными в мире являются огнетушащие порошковые составы (ОПС) на основе фосфатов аммония, ингибирующие процессы горения, которые обладают высокой удельной эффективностью пожаротушения и способны тушить все классы пожаров [1, 2]. Однако они демонстрируют высокую гигроскопичность и склонность к агрегированию частиц, что отражается на физико-химических свойствах порошковой системы и ее стабильности при хранении [3].

В рамках настоящего исследования был рассмотрен и проанализирован подход к получению огнетушащих материалов на основе гидроксида магния ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), обладающих высокой охлаждающей способностью. С этой целью использовался метод распылительной сушки, который включает создание тонкодисперсного аэрозоля путем распыления жидкой фазы через сопло под высоким давлением. Аэрозоль подвергается сушке горячим воздухом ($\sim 200^\circ\text{C}$) в сушильной камере. Применение данного метода обеспечивает получение частиц сферической формы и определенного распределения по размерам, что улучшает сыпучесть и снижают сцепление между частицами порошка. Для придания поверхности синтезированных частиц гидрофобных свойств их модифицировали с использованием полиметилгидросилоксана (ПМГС).

На первом этапе осуществлялось осаждение $\text{Mg}(\text{OH})_2$ из раствора хлорида магния (MgCl_2) в присутствии гидроксида натрия (NaOH). В результате были получены частицы со средним размером 7,72 мкм. Полученную суспензию $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (в соотношении 1/10 по массе к воде) подвергали распылительной сушке, после чего проводилась модификация полученных частиц с использованием 5 % раствора ПМГС в гексане.

На втором этапе получали супрачастицы, ядро которых составляет дигидрофосфат калия ($\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$), а оболочка представляет собой наноразмерные частицы гидроксида магния [4]. Данный подход позволяет, с одной стороны, объединить в рамках одной структуры ингибирующее действие как материала ядра ($\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$), связанное с образованием метафосфата калия, задерживающего диффузию кислорода из внешней среды к зоне возгорания, так и оболочки (наночастицы $\text{Mg}(\text{OH})_2$), активно охлаждающей зону очага ниже температуры воспламенения выделяющимися в процессе разложения парами воды. С другой стороны, сферическая оболочка из гидрофобных наночастиц $\text{Mg}(\text{OH})_2$, которая формируется в процессе распылительной сушки за счет переноса наночастиц суспензии водяным паром из объема капель на поверхность, позволит, во-первых, изолировать гидрофильный материал ядра от действия влаги воздуха, во-вторых, снизить межчастичное взаимодействие за счет заданной сферической формы и супергидрофобных свойств поверхности.

Синтез наночастиц $\text{Mg}(\text{OH})_2$ осуществлялся по следующей схеме: в раствор соли $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1 М и ПАВ цетилтриметиламмония бромид (СТАВ) с массовой долей 1 % добавляли при перемешивании по каплям (2 мл/мин) раствор NaOH 2 М. Далее, для улучшенной кинетики химических реакций и кристаллизации проводился гидротермальный синтез в автоклавах при температуре 180°C 18 ч. Затем гидроксид магния промыли от ПАВ водой и спиртом с использованием центрифуги со скоростью 5 тыс. об/в мин в течение 4 мин. Промытый осадок поместили в сушильный шкаф с температурой 120°C на 5 ч. Полученные наночастицы $\text{Mg}(\text{OH})_2$ имели размер 190 нм.

На рис. 1 представлены сферические частицы, образовавшиеся в результате распылительной сушки суспензии осажденного $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Рис. 2 демонстрирует аналогичные по форме частицы, полученные путем распылительной сушки суспензии наночастиц $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в растворе $\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$. Распределение элементов по поверхности оболочки супрачастицы показывает преимущественное присутствие Mg. Распределение размеров синтезированных частиц представлено на рис. 3.

В проведенном исследовании определены реологические характеристики следующих мелкодисперсных порошковых материалов: частицы $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и $\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$, полученные в результате измельчения (И) и используемые в качестве компонентов ОПС; частицы $\text{Mg}(\text{OH})_2$, полученные в результате распылительной сушки (РС); супрачастицы с соотношением компонентов $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ — 2/1 (табл., рис. 4). Наименьшее значение когезии (0,28 кПа) показали сферические частицы $\text{Mg}(\text{OH})_2$, что указывает на их свободную текучесть и минимальную склонность к агрегации. В сравнении с ними супрачастицы имеют более высокое значение когезии (0,63 кПа), что свидетельствует об увеличении сил сцепления между частицами порошка. С другой стороны, мелкодисперсные порошки исходных материалов $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и $\text{K}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$, применяемых в системах пожаротушения, демонстрируют затрудненное течение, характеризуемое значениями когезии, равными 2,09 и 1,19 кПа соответственно.

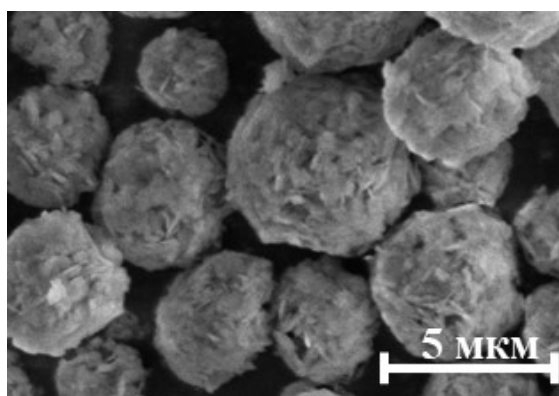


Рис. 1. СЭМ-изображения частиц, полученные методом распылительной сушки суспензии $\text{Mg}(\text{OH})_2$

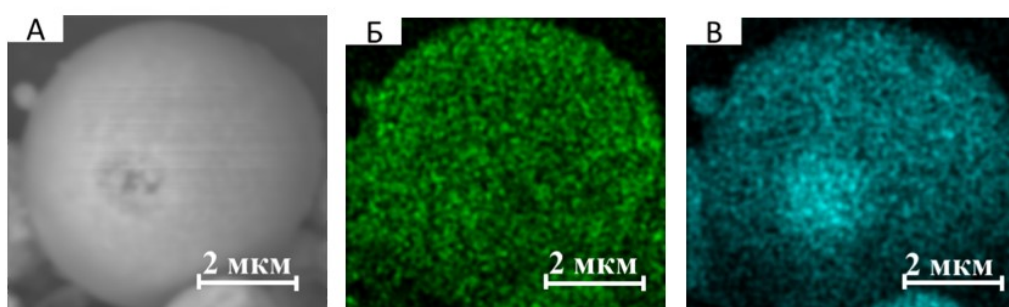


Рис. 2. Супрачастица с соотношением компонентов $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{KH}_2\text{PO}_4$ — 2/1 (а), с распределением Mg (б) и P (в) по поверхности оболочки

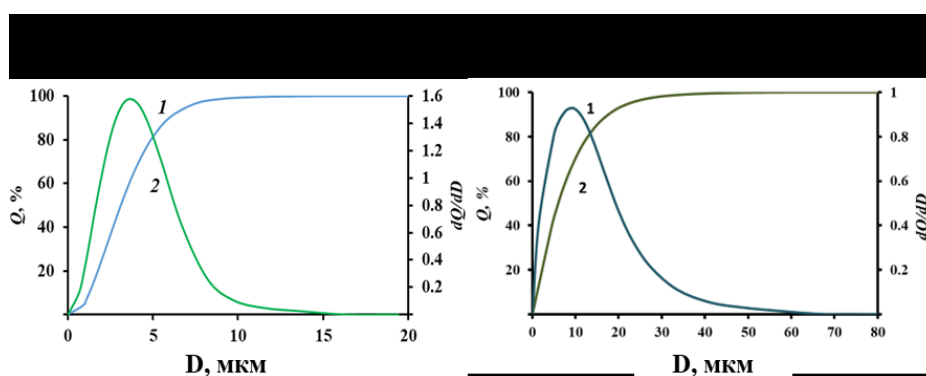


Рис. 3. Распределение размеров частиц, полученных методом распылительной сушки: $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (а) и $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{KH}_2\text{PO}_4$ — 2/1 (б), где 1 — интегральное распределение; 2 — дифференциальное распределение

Таблица

Реологические характеристики порошковых материалов

Материал	Когезия, кПа	Коэффициент функции истечения (КФИ) [5]
$\text{Mg}(\text{OH})_2$ (И)	2,09	2,29
KH_2PO_4 (И)	1,19	3,62
$\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{KH}_2\text{PO}_4$ — 2/1 (РС)	0,63	6,70
$\text{Mg}(\text{OH})_2$ (РС)	0,28	15,19

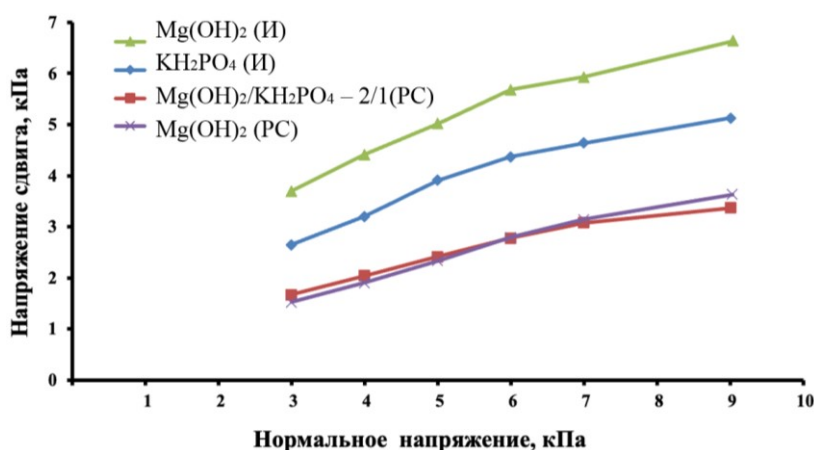


Рис. 4. Результаты сдвигового теста порошковых материалов

Кроме того, было проведено исследование влияния частиц порошков на скорость распространения пламени пропано-воздушной смеси (4 % C_3H_8 + 96 % воздух) с использованием экспериментального стенда. Пламя стабилизировалось на выходе вертикальной кварцевой трубки диаметром 5 мм. Визуализация проводилась с помощью высокоскоростной камеры в сочетании с импульсным лазером. На изображениях, представленных на рис. 5а, б, показано сравнение формы пламени без добавления частиц и при их наличии в потоке. Для оценки высоты пламени применялся оптический фильтр, отсекающий красный спектральный диапазон (рис. 5в). Наблюдаемое снижение концентрации частиц на удалении от вершины пламени указывает на их активное участие в подавлении распространения пламени. В результате внесения частиц происходит замедление фронта горения, что сопровождается увеличением видимой высоты пламени.

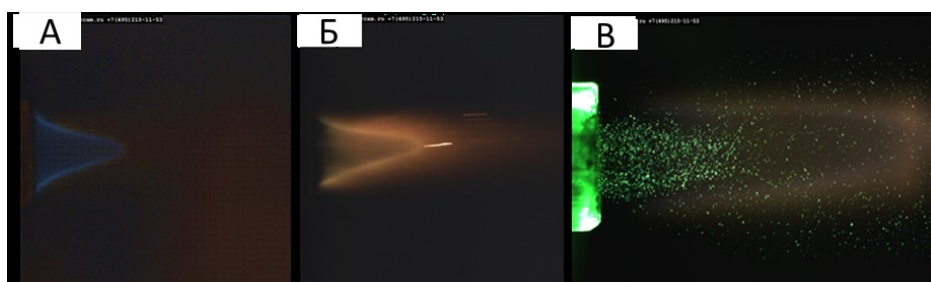


Рис. 5. Изображение пламени: а — без частиц; б — с частицами; в — при наложении оптического фильтра

На рис. 6 показана зависимость относительной высоты пламени от объемной плотности частиц следующих порошковых материалов: $Mg(OH)_2$ (PC), KN_2PO_4 (И), супрачастиц с соотношением компонентов $Mg(OH)_2/KN_2PO_4$ – 2/1 (PC). Как видно из графика, введение в газовый поток супрачастиц состава $Mg(OH)_2/KN_2PO_4$ 2/1 при объемной плотности 40 мм^3 приводит к увеличению относительной высоты пламени примерно на 15 %. В то же время использование частиц на основе $Mg(OH)_2$ или KN_2PO_4 при аналогичной плотности не оказывает заметного влияния на характеристики пламени.

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Было реализовано два подхода к получению порошкового материала на основе гидроксида магния с высокой охлаждающей способностью. Первый подход включал осаждение $Mg(OH)_2$ с последующей распылительной сушкой и модификацией ПМГС, что позволило получить сферические частицы с низкой когезией и высокой сыпучестью. Второй подход основывался на создании супрачастиц со структурой «ядро – оболочка», где ядром служит KN_2PO_4 , а оболочкой — наночастицы $Mg(OH)_2$. Такая структура обеспечила двойной механизм подавления пламени: ингибирование горения за счет образования метафосфата калия и охлаждение очага горения, что позволило добиться синергитического эффекта. Реологические испытания показали легкотекучие свойства частиц, правильная форма которых достигается в результате процесса

распылительной сушки. Полученные результаты указывают на перспективность использования полученных порошковых материалов для создания нового поколения ОПС.

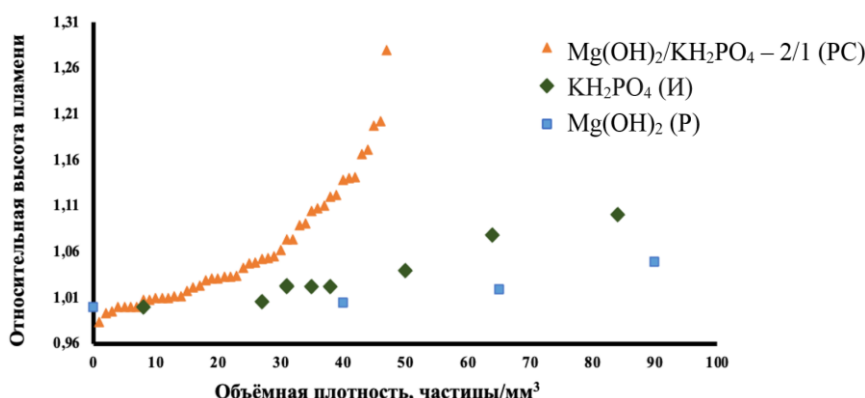


Рис. 6. Зависимости относительной высоты пламени от объемной плотности частиц

Список источников

1. Li H., Hao J., Tianwei Z., Du Z. Experimental study of flame extinguishing of red pine wood pyrolysis gas by $NH_4H_2PO_4$ powder based on Cupburner // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 41. P. 102675.
2. Lin Z., Zhang T., Zhang J., Chen Z., Zhang Q., Yu Y., Bu Y., Chen T., Jiang J. Effects of fire extinguishing agents on pyrolysis and explosion characteristics of optical brightener dust // J. Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 80. P. 104886.
3. Kimata M., Shinohara T., Narita T., Takatsuka Y. Study on Flow Property Evaluation of High Flowability ABC Powder // J. Society of Powder Tech. Japan. 2022. Vol. 59(8). P.407–411.
4. Rajabimashhadi Z., Naghizadeh R., Zolriasatein A., Corcione C. Novel synthesis of nano $Mg(OH)_2$ by means of hydrothermal method with different surfactants // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. P. 454.
5. Valtsifer I., Huo Y., Zamashchikov V., Shamsutdinov A., Kondrashova N., Sivtseva A., Pyankova A., Valtsifer V. Synthesis of hydrophobic nanosized silicon dioxide with a spherical particle shape and its application in fire-extinguishing powder compositions based on struvite // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. P. 1186.

References

1. Li H., Hao J., Tianwei Z., Du Z. Experimental study of flame extinguishing of red pine wood pyrolysis gas by $NH_4H_2PO_4$ powder based on Cupburner // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 41. P. 102675.
2. Lin Z., Zhang T., Zhang J., Chen Z., Zhang Q., Yu Y., Bu Y., Chen T., Jiang J. Effects of fire extinguishing agents on pyrolysis and explosion characteristics of optical brightener dust // J. Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 80. P. 104886.
3. Kimata M., Shinohara T., Narita T., Takatsuka Y. Study on Flow Property Evaluation of High Flowability ABC Powder // J. Society of Powder Tech. Japan. 2022. Vol. 59(8). P.407–411.
4. Rajabimashhadi Z., Naghizadeh R., Zolriasatein A., Corcione C. Novel synthesis of nano $Mg(OH)_2$ by means of hydrothermal method with different surfactants // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. P. 454.
5. Valtsifer I., Huo Y., Zamashchikov V., Shamsutdinov A., Kondrashova N., Sivtseva A., Pyankova A., Valtsifer V. Synthesis of hydrophobic nanosized silicon dioxide with a spherical particle shape and its application in fire-extinguishing powder compositions based on struvite // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. P. 1186.

Информация об авторах

А. И. Сабурова — аспирант;

А. Ш. Шамсутдинов — кандидат технических наук, научный сотрудник;

В. В. Замашчиков — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник;

И. В. Вальцифер — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

A. I. Saburova — Graduate Student;

A. Sh. Shamsutdinov — Ph.D. in Technical Sciences, Researcher;

V. V. Zamashchikov — Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher;

I. V. Valtsifer — PhD (Technical), Researcher, Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 01.07.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 27.08.2025.
The article was submitted 01.07.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 27.08.2025.