

Научная статья  
УДК 614.842  
doi: 10.17223/29491665/5/1

## Влияние кристаллогидратов солей в огнетушащем порошковом составе на его удельную эффективность тушения легковоспламеняющейся жидкости

Игорь Викторович Вальцифер<sup>1</sup>, Артем Шамсутдинов<sup>2</sup>,  
Виктор Александрович Вальцифер<sup>3</sup>, Владимир Николаевич Стрельников<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> *Институт технической химии УрО РАН – филиал  
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия*

<sup>1</sup> *valtsifer.i@itcras.ru*

<sup>2</sup> *shamsutdinov.a@itcras.ru*

<sup>3</sup> *valtsifer.v@itcras.ru*

<sup>4</sup> *info@itcras.ru*

**Аннотация.** В работе представлена сравнительная оценка удельной пожаротушающей эффективности порошковых составов, содержащих в качестве газогенерирующего компонента соли кристаллогидратов. Методами термодинамических расчетов и экспериментальных испытаний доказано снижение расхода порошковых составов на тушение легковоспламеняющейся жидкостей не менее чем на 30% при использовании в качестве газогенерирующего компонента гексагидрата магний-аммоний фосфата  $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Показано преимущество введения мелкодисперсных частиц кристаллогидрата ( $d < 20$  мкм), синтезированных в процессе контролируемого осаждения, в сравнении с аналогами, получаемыми в результате механического измельчения ( $d < 100$  мкм).

**Ключевые слова:** огнетушащий порошковый состав, кристаллогидраты, струвит, удельная эффективность тушения

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках научного проекта «Огнетушащий порошковый состав комбинированного газогенерирующего воздействия» (№ С-26/543, 18.03.2021).

**Для цитирования:** Вальцифер И.В., Шамсутдинов А.Ш., Вальцифер В.А., Стрельников В.Н. Влияние кристаллогидратов солей в огнетушащем порошковом составе на его удельную эффективность тушения легковоспламеняющейся жидкости // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 5–11. doi: 10.17223/29491665/5/1

Original article  
doi: 10.17223/29491665/5/1

## The influence of crystalline salt hydrates in a fire extinguishing powder composition on its specific effectiveness in extinguishing flammable liquids

Igor V. Valtsifer<sup>1</sup>, Artem S. Shamsutdinov<sup>2</sup>, Viktor A. Valtsifer<sup>3</sup>,  
Vladimir N. Strelnikov<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> *Institute of Technical Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch  
of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation*

<sup>1</sup> *valtsifer.i@itcras.ru*

<sup>2</sup> *shamsutdinov.a@itcras.ru*

<sup>3</sup> *valtsifer.v@itcras.ru*

<sup>4</sup> *info@itcras.ru*

**Abstract.** The article presents the comparative evaluation of specific fire extinguishing efficiency of powder compositions containing crystalline hydrate salts as a gas-generating component. Thermodynamic calculations and experimental tests have shown a reduction in the consumption of powder compositions for extinguishing highly flammable liquids by at least 30% when hexahydrate of magnesium-ammonium phosphate  $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  is used as a component of fire extinguishing powders. The research has shown the advantage of implementing fine particles of crystalline hydrates ( $d < 10$  μm) obtained during the controlled precipitation process compared to analogs manufactured by mechanical grinding ( $d < 100$  μm).

**Keywords:** fire extinguishing powder composition, crystalline hydrates, specific extinguishing efficiency

**Acknowledgments:** The reported study was supported by the Government of Perm Krai, research project No. C-26/543.

**For citation:** Valtsifer, I.V., Shamsutdinov, A.S., Valtsifer V.A. & Strelnikov, V.N. (2024) The influence of crystalline salt hydrates in a fire extinguishing powder composition on its specific effectiveness in extinguishing flammable liquids. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 5–11. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/1

## Введение

Известно, что ликвидация очага горения огнетушащими порошковыми составами (ОПС) может быть реализована по следующим механизмам [1–5]:

- образование на поверхности горящего материала полимерной пленки полифосфатов и, соответственно, её экранирующее и изолирующее действие (в случае использования порошков на основе фосфатов аммония);

- понижение содержания кислорода воздуха в горючей смеси путем разбавления негорючими газами;

- гомогенное ингибирование, если испарившиеся при введении в зону горения порошков продукты являются химически активными ингибиторами;

- охлаждение зоны реакций вследствие поглощения тепла частицами малой массы с большой суммарной теплоемкостью и тепловоспринимающей поверхностью вследствие протекания эндотермического процесса разложения компонентов ОПС.

На сегодняшний день принцип действия большинства известных промышленно выпускаемых ОПС связан именно с образованием на поверхности горящих материалов изолирующей пленки. Дальнейшее повышение удельной эффективности ОПС может быть достигнуто за счет действия механизмов тушения, связанных с охлаждением зоны горения эндотермическими реакциями разложения и разбавлением горючей смеси выделяющимися парами воды. Данный подход может быть реализован путем использования в качестве компонентов ОПС солей кристаллогидратов, способных значительно снижать температуру очага горения за счет содержания связанных молекул воды [6, 7]. Следовательно, совместное применение в качестве тушащих компонентов фосфатов аммония и солей кристаллогидратов позволит повысить пожаротушащую эффективность составов путем комбинированного действия различных механизмов подавления пламени.

Анализ литературных и патентных источников показал существующие разработки в области создания огнетушащего порошка, содержащего в качестве тушащего компонента соли кристаллогидратов.

Известен патент [8], описывающий получение ОПС на основе неорганических солей сульфатов и сульфидов (сульфата цинка, сульфата железа, сульфида цинка, сульфида железа и сульфата алюминия), содержащих кристаллизационную воду. Согласно па-

тенту [9], в качестве активного огнетушащего компонента ОПС может быть использован кристаллогидрат карбоната натрия (не менее 48% в составе), содержащий 10% связанной воды. Удельная эффективность тушения легковоспламеняющейся жидкости в данном случае составляет 0,83 кг/м<sup>2</sup>. Значительные результаты достигнуты в разработке, представленной в патенте [10], в котором описан способ получения ОПС на основе не растворимых в воде кристаллогидратов неорганических солей, например,  $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 22H_2O$ ,  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ,  $Al_2O_3 \cdot SO_3 \cdot 9H_2O$ , содержащих химически связанную воду в количестве 25–62%. Кристаллогидраты могут применяться в смеси с добавками для улучшения течения (гидрофобный аморфный диоксид кремния) либо с добавлением активного компонента другого класса (фосфаты аммония, хлорид калия, сульфат аммония, бикарбонат натрия), доля которых достигает 25–70%. Удельная тушащая эффективность составов в данном примере варьируется от 0,43 до 0,59 кг/м<sup>2</sup>.

На основе патентно-литературных источников можно сделать вывод о том, что существуют разработки в области создания ОПС, содержащих соли кристаллогидратов, однако данные о внедрении разработок в промышленное производство отсутствуют. Недостатком большинства представленных ОПС является высокая гигроскопичность неорганических солей, входящих в их состав, и, следовательно, склонность к слеживанию. Очевидно, это приводит к ухудшению текучести и эксплуатационных свойств порошков, что в конечном итоге снижает их эффективность. Кроме того, практически все способы получения включают стадию измельчения солей кристаллогидратов до необходимого уровня дисперсности частиц, что приводит к их дегидратации в результате локальных разогревов и, следовательно, к снижению доли связанной воды в готовом ОПС.

В данной статье рассмотрена возможность применения в качестве одного из тушащих компонентов ОПС гексагидрата магний-аммоний фосфата (струвит)  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  (до 44% химически связанной воды), процесс синтеза которого является простым, экологичным и доступным [12–14]. Ранее разработанный способ контролируемого осаждения кристаллогидрата из раствора позволил получить дисперсный компонент со средним размером частиц около 20 мкм и удельной поверхностью до 25 м<sup>2</sup>/г без применения высокоэнергетического механического из-

мельчения [15]. С целью решения проблемы, связанной с процессами слеживания и перекристаллизации, был создан комплексный супергидрофобный функциональный наполнитель на основе сферических частиц диоксида кремния размером  $\sim 30$  нм, позволяющий создать покрытие для частиц кристаллогидрата, защищающее их от действия влаги воздуха (краевой угол смачивания воды  $\sim 160^\circ$ ) и придающее свободнотекучие свойства [16, 17].

Таким образом, целью настоящего исследования являлась оценка удельной эффективности тушения легковоспламеняющейся жидкости огнетушащим составом, содержащим в качестве основных компонентов моноаммонийфосфат и струвит, в сравнении с существующими патентными и промышленными аналогами.

### Методика эксперимента

Для предварительной оценки газогенерирующей способности исследуемого состава и определения продуктов его разложения при тушении легковоспламеняющейся жидкости (бензин) проведены термодинамические расчеты с помощью программного комплекса TERRA, предназначенного для расчета состава фаз и термодинамических свойств произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями. Данный программный комплекс позволяет проводить расчет реакций в термодинамически равновесных условиях, происходящих между основными компонентами процесса горения, с определением продуктов сгорания и оценки их количества.

Для получения исследуемого состава комбинированного газогенерирующего воздействия (ОПС КГВ) на основе моноаммонийфосфата и гексагидрата магний-аммоний фосфата (струвит) были изготовлены порошковые смеси, где соотношение компонентов составило:  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  65% /  $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  30% /  $\text{SiO}_2$  5%. Смешение компонентов для равномерного распределения частиц функционального наполнителя в порошковой смеси осуществляли в шаровой мельнице в течение 3 ч. Указанное содержание струвита является максимальным, при котором возможно использование в составе высокодисперсного компонента при сохранении технических характеристик состава в рамках требований ГОСТ [18].

Температурные интервалы и значения энтальпии разложения компонентов порошковых составов определяли методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью термогравиметрического анализатора TGA/DSC1 (METTLER-TOLEDO) на

воздухе при скорости нагревания  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$  в интервале температур  $25\text{--}800^\circ\text{C}$ .

Испытания по определению удельной эффективности тушения исследуемым ОПС модельного очага пожара легковоспламеняющейся жидкости проводились в соответствии с методом, представленным в НПБ и ГОСТ [18, 19]. Огнетушащая способность порошка в соответствии с методом оценивалась по его способности тушить очаг пожара класса В площадью  $1,75\text{ м}^2$ , заполненного 55 л горючей жидкости [20], при подаче порошка из закачного огнетушителя вместимостью 4 кг. Огнетушитель закреплен слева от противня с бензином и защищен теплоизолирующим экраном. Кроме того, в течение первых 60 с [19] после воспламенения и разогрева очага возгорания, огнетушитель был отведен от пламени и направлялся в сторону очага непосредственно перед началом тушения. Система тушения приводилась в действие дистанционно. Удельная эффективность пожаротушения составов определялась из расчета среднего значения массы порошка, пошедшей на тушение модельного очага возгорания заданной площади в результате трех параллельных определений.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

В табл. 1 представлены рассчитанные газообразные продукты, которые образуются при горении бензина, а также при его тушении составами на основе моноаммонийфосфата (средняя колонка) и его смеси со струвитом (правая колонка). Согласно результатам термодинамических расчетов, при включении в порошковый состав кристаллогидрата процесс тушения бензина сопровождается снижением температуры продуктов сгорания с  $1893$  до  $1767^\circ\text{C}$ , а газогенерирующая способность (увеличение объема продуктов сгорания) составляет  $0,64\text{ м}^3$  на  $1\text{ кг}$  ОПС. При этом объем образующегося водяного пара в составе продуктов сгорания увеличивается на  $1,02\text{ м}^3$ . В процессе тушения исследуемым порошковым составом комбинированного воздействия очевидно не только образование водяного пара, но и снижение объема  $\text{CO}_2$  в продуктах реакции, что говорит о прерывании цепных реакций горения раньше момента полного сгорания продуктов.

Повышение пожаротушащей эффективности, спрогнозированное термодинамическими расчетами продуктов взаимодействия порошковых составов с пламенем, было доказано экспериментами по тушению модельного очага пожара легковоспламеняющейся жидкости площадью  $1,75\text{ м}^2$  с помощью огнетушителя, снаряженного исследуемым составом с 30% долей струвита (рис. 1).

Таблица 1

Результаты термодинамических расчетов газообразных продуктов, выделяющихся в процессах горения бензина и его тушения огнетушащими порошковыми составами

| Бензин, 2008 °С  |                    |       | Тушение ОПС (95% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), 1893 °С |                    |       | Тушение ОПС (65% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , 30% $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 1767 °С |                    |       |
|------------------|--------------------|-------|--|--------------------|-------|---|--------------------|-------|
|                  | м <sup>3</sup> /кг | %     |  | м <sup>3</sup> /кг | %     |   | м <sup>3</sup> /кг | %     |
| O <sub>2</sub>   | 0,042              | 0,65  | O <sub>2</sub>   | 0,064              | 1,05  | O <sub>2</sub>  | 0,011              | 0,17  |
| H <sub>2</sub>   | 0,020              | 0,31  | H <sub>2</sub>   | 0,013              | 0,21  | H <sub>2</sub>  | 0,019              | 0,29  |
| H <sub>2</sub> O | 0,893              | 13,5  | H <sub>2</sub> O   | 1,469              | 24,00 | H <sub>2</sub> O  | 1,976              | 30,74 |
| N <sub>2</sub>   | 4,780              | 72,4  | N <sub>2</sub>   | 3,818              | 62,39 | N <sub>2</sub>  | 4,134              | 64,31 |
| NO               | 0,017              | 0,25  | NO   | 0,014              | 0,23  | NO  | 0,004              | 0,07  |
| CO               | 0,093              | 1,42  | CO   | 0,021              | 0,35  | CO  | 0,008              | 0,13  |
| CO <sub>2</sub>  | 0,751              | 11,38 | CO <sub>2</sub>  | 0,469              | 7,77  | CO <sub>2</sub>   | 0,194              | 3,02  |
|                  |                    |       | PO <sub>2</sub>  | 0,189              | 3,08  | PO <sub>2</sub>   | 0,066              | 1,02  |
|                  |                    |       | P <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                                  | 0,002              | 0,03  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0,015              | 0,23  |
|                  |                    |       | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                                  | 0,054              | 0,88  | SO <sub>2</sub>   | 0,002              | 0,01  |
| Итого:           | 6,6                | 99,91 | Итого:   | 6,110              | 99,99 | Итого:  | 6,420              | 99,99 |



Рис. 1. Процесс тушения модельного очага возгорания бензина (площадь – 1,75 м<sup>2</sup>) исследуемым огнетушащим порошковым составом (масса заряда огнетушителя – 4 кг)

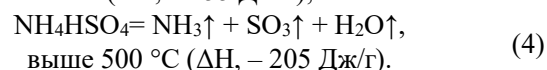
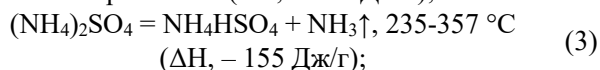
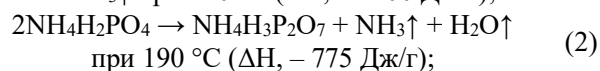
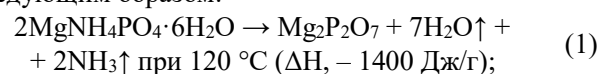
Fig. 1. The extinguishing process of the model fire source of gasoline (area – 1.75 m<sup>2</sup>) with the tested fire extinguishing powder composition (fire extinguisher charge weight – 4 kg)

Из данных табл. 2 следует, что расход исследуемого ОПС на тушение модельного очага составил менее одного килограмма. Это соответствует значению удельной эффективности тушения, равному 0,3 кг/м<sup>2</sup>. Данный показатель демонстрирует не менее чем на 30% меньший расход исследуемого состава с комбинированным механизмом ингибирования пламени в сравнении с аналогами, представленными в патентах. Данные показатели были достигнуты в том числе за счет ранее указанных особенностей частиц струвита, а именно: высокой дисперсности и удельной площади поверхности, которые увеличивают скорость поглощения тепла.

Таблица 3 содержит результаты экспериментальных испытаний по тушению легковоспламеняющейся жидкости следующими составами: моноаммонийфосфатом, смесью моноаммонийфосфата со струвитом (ОПС КГВ), смесью моноаммонийфосфата с сульфатом аммония. Доля газогенерирующего компонента на основе сульфата аммония в последнем образце соответствует соотношению компонентов в

промышленно выпускаемом ОПС общего назначения, представленном в патенте [21].

Схемы реакций термического разложения компонентов составов при росте температуры выглядят следующим образом:



Из представленных схем очевидны преимущества газогенерирующего компонента на основе струвита (1), (2) в сравнении с сульфатом аммония (3), (4), применяемым в промышленных аналогах: во-первых, в 2 раза более низкая температура начала разложения и, во-вторых, наличие кристаллизационной воды, обеспечивающей значительное превосходство показателя общей теплоты разложения.

Таблица 2

## Сравнение характеристик исследуемого огнетушащего порошкового состава с аналогами, содержащими соли кристаллогидратов

| Критерии  | ОПС КГВ | Аналоги   |   |  |  |
|---|---------|---|---|--|--|
|   |         | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ | $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ | $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$<br>$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ |
| Доля кристаллогидрата, %  | 30,0    | 97,0  | 97,5  | 98,0   | 70,0   |
| Содержание связанной воды в порошке, %                            | 15,0    | 45,7  | 58,7  | 43,2   | 30,9   |
| Доля тушащего компонента другого класса, %                        | 65,0    | –   | –   | –  | 25,8   |
| Удельная огнетушащая эффективность по классу В, кг/м <sup>2</sup> | 0,30    | 0,55  | 0,41  | 0,48   | 0,59   |

Таблица 3

## Сравнение характеристик исследуемого огнетушащего порошкового состава с аналогами

| Критерии  | ОПС КГВ | $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ | $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,<br>$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ |
|---|---------|------------------------------------|--|
| Доля газогенерирующего компонента, %                              | 30      | –                                  | 50   |
| Доля тушащего компонента другого класса, %                        | 65      | 95                                 | 35   |
| Тепловой эффект разложения, Дж/г                                  | 850     | 775                                | 600  |
| Удельная огнетушащая эффективность по классу В, кг/м <sup>2</sup> | 0,30    | 0,44                               | 0,91   |

Из результатов сравнительной оценки удельной эффективности тушения порошковыми составами легковоспламеняющейся жидкости следует, что введение частиц струвита, полученных по разработанной технологии, в смесь с моноаммонийфосфатом позволяет достигнуть комбинированного воздействия на пламя двух механизмов ингибирования горения и, следовательно, увеличить показатель пожаротушащей эффективности состава ОПС КГВ на 25–60% как по отношению к чистому моноаммонийфосфату, так и его смеси с сульфатом аммония.

## Выводы

В рамках предложенного способа получения ОПС, содержащего газогенерирующий компонент на основе гексагидрата магний-аммоний фосфата (струвит), проведены термодинамические расчеты продуктов, образующихся при тушении ОПС возгорания легковоспламеняющейся жидкости. Показано увеличение доли среди выделяющихся газообразных продуктов паров воды и азота в сравнении с повсеместно

используемым моноаммонийфосфатом, что свидетельствует о потенциале применения газогенерирующего компонента в составе огнетушащих порошков.

С целью проверки полученных результатов был изготовлен образец ОПС КГВ, содержащий 30% струвита с размером частиц менее 20 мкм и удельной поверхностью до 25 м<sup>2</sup>/г. Путем экспериментальных испытаний было доказано превосходство удельной пожаротушащей эффективности предложенного состава на 25% по отношению к показателям существующих аналогов на основе солей кристаллогидратов.

Продемонстрировано преимущество комбинированного действия механизмов пожаротушения моноаммонийфосфата и струвита в сравнении с промышленно выпускаемым составом ОПС общего назначения, содержащим в качестве газогенерирующего компонента сульфат аммония. Показано, что использование разработанного газогенерирующего компонента на основе струвита в составе ОПС КГВ позволяет улучшить на 25–60% показатели удельной эффективности тушения легковоспламеняющейся жидкости по сравнению как с чистым моноаммонийфосфатом, так и его смесью с сульфатом аммония.

## Список источников

1. Wang X. Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent // Journal of Physics: Conference Series. 2023. P. 2539. doi: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091
2. Nolan D. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. Fourth Edition. Gulf Professional Publishing, 2019. P. 522. doi: 10.1016/C2017-0-04314-8

3. Lapshin D.N., Kunin A.V., Semenov A.D. Influence of Chemical Impurities in Ammonium Phosphate and Ammonium Sulfate on the Properties of ABCE Fire Extinguishing Dry Powders // *Russian Journal of General Chemistry*. 2016. Vol. 86. P. 439–449. doi: 10.1134/S1070363216020444
4. Xiaomin N., Chow W.K., Guangxuan L. Discussions on Applying Dry Powders to Suppress Tall Building Fires // *Journal of applied fire science*. 2009. Vol. 18. P. 155–191. doi: 10.2190/AF.18.2.d
5. Kuang K., Huang X., Liao G. A Comparison between Superfine Magnesium Hydroxide Powders and Commercial Dry Powders on fire Suppression Effectiveness // *Process Safety Environ. Protection*. 2008. Vol. 86. P. 182–188. doi: 10.1016/j.psep.2007.11.002
6. Gurchumelia L., Tsarakhov M., Machaladze T., Tkemaladze S., Bejanov F., Chudakova O. Elaboration of New Types, Environmentally Safe Fire-Extinguishing Powders and Establish the Conditions of Extinguish Optimum and Effective Use of Such Powders // *Modern Chemistry & Applications*. 2018. Vol. 6. P. 257–266. doi: 10.4172/2329-6798.1000257
7. Haiqiang L., Ruowena Z., Jiaxina G., Siuming L., Yuana H. A Good Dry Powder to Suppress High Building Fires // *APCBEE Proc*. 2014. Vol. 9. P. 291–295. doi: 10.1016/j.apcbee.2014.01.052
8. Pat. CN102512779B. Dry powder fire extinguishing agent / Suzhou University (publ. date: 27.06.2012).
9. Patent US4149976A. Powder for extinguishing fires of liquid substances or of a mixture of liquid substances / Reuillon M., Mellottee H., Alfille L., Duco J., Fruchard Y., Malet J.-C., Chappellier A., Devillers B. Current Assignee: Commissariat a l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives CEA (publ. date: 17.04.1976).
10. Патент 2277003 Российская Федерация. Огнетушащий порошковый состав / Вершинин С.Н. № 2004118342/15, заявл. 16.06.2004; опубл. 27.05.2006. Бюл. № 15. 11 с.
11. Zhang S., Shi H.-S., Huang S.-W., Zhang P. Dehydration Characteristics of Struvite-K Pertaining to magnesium potassium phosphate cement System in Non-Isothermal Condition // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013. Vol. 111. P. 35–40. doi: 10.1007/s10973-011-2170-9
12. Shih K., Yan H. The Crystallization of Struvite and its Analog (K-struvite) from Waste Streams for Nutrient Recycling // *Environmental materials and waste*. 2016. P. 665–686. doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00026-3
13. Siciliano A., Limonti C., Curcio G.M., Molinari R. Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, № 18. P. 1–36. doi: 10.3390/su12187538
14. Пьянкова А.В., Кондрашова Н.Б., Вальцифер И.В., Шамсутдинов А.Ш., Бормашенко Э.Ю. Синтез и термическое поведение мелкодисперсного порошкового огнегасящего агента на основе струвита // *Неорганические материалы*. 2021. Т. 57, № 10. С. 1144–1152. doi: 10.31857/S0002337X21100122
15. Хуо Ян, Вальцифер И.В., Шамсутдинов А.Ш., Кондрашова Н.Б., Замашчиков В.В., Пьянкова А.В. Синтез и применение гидрофобного диоксида кремния для улучшения реологических свойств огнетушащих составов на основе струвита // *Физика горения и взрыва*. 2023. Т. 59, № 6. С. 70–81. doi: 10.15372/FGV2022.9263
16. Valtsifer I.V., Huo Y., Zamashchikov V.V., Shamsutdinov A.S., Kondrashova N.B., Sivtseva A.V., Pyankova A.V., Valtsifer V.A. 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. doi: 10.3390/nano13071186
17. ГОСТ 27331-87. Пожарная техника. Классификация.
18. ГОСТ Р 53280.4-2009. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 4: Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования и методы испытаний.
19. НПБ 170-98. Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования. Методы испытаний.
20. ГОСТ Р 51057-2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний.
21. Патент 2155088 Российская Федерация. Огнетушащий порошок многоцелевого назначения / Кушук В.А., Попов А.В., Сыровцева Л.А., Чумаевский В.А. № 99104700/12, заявл. 11.03.1999; опубл. 27.08.2000. Бюл. № 24. 6 с.

## References

1. Wang, X. (2023) Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent. *Journal of Physics: Conference Series*. Art. No. 2539. pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091
2. Nolan, D. (2019) *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*. Fourth Edition. Gulf Professional Publishing. doi: 10.1016/C2017-0-04314-8
3. Lapshin, D.N., Kunin, A.V. & Semenov, A.D. (2016) Influence of Chemical Impurities in Ammonium Phosphate and Ammonium Sulfate on the Properties of ABCE Fire Extinguishing Dry Powders. *Russian Journal of General Chemistry*. 86. pp. 439–449. doi: 10.1134/S1070363216020444
4. Xiaomin, N., Chow, W.K. & Guangxuan, L. (2009) Discussions on Applying Dry Powders to Suppress Tall Building Fires. *Journal of Applied Fire Science*. 18. pp. 155–191. doi: 10.2190/AF.18.2.d
5. Kuang, K., Huang, X. & Liao, G.A. (2008) Comparison between Superfine Magnesium Hydroxide Powders and Commercial Dry Powders on fire Suppression Effectiveness. *Process Safety Environ. Protection*. 86. pp. 182–188. doi: 10.1016/j.psep.2007.11.002
6. Gurchumelia, L., Tsarakhov, M., Machaladze, T., Tkemaladze, S., Bejanov, F. & Chudakova, O. (2018) Elaboration of New Types, Environmentally Safe Fire-Extinguishing Powders and Establish the Conditions of Extinguish Optimum and Effective Use of Such Powders. *Modern Chemistry & Applications*. 6. pp. 257–266. doi: 10.4172/2329-6798.1000257
7. Haiqiang, L., Ruowena, Z., Jiaxina, G., Siuming, L. & Yuana, H. (2014) A Good Dry Powder to Suppress High Building Fires. *APCBEE Proceedings*. 9. pp. 291–295. doi: 10.1016/j.apcbee.2014.01.052
8. Patent CN102512779B. Dry powder fire extinguishing agent / Suzhou University. Publication date 27.06.2012
9. Reuillon, M., Mellottee, H., Alfille, L., Duco, J., Fruchard, Y., Malet, J.-C., Chappellier, A. & Devillers, B. (1976) Patent US4149976A. Powder for extinguishing fires of liquid substances or of a mixture of liquid substances / Current Assignee: Commissariat a l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives CEA. Publication date 17.04.1976.
10. Vershinin, S.N. (2006) Patent RU2155088C1. *Ognetushashchii poroshkovyi sostav* [Fire extinguishing composition]. № 2004118342/15, appl. 16.06.2004; publication date 27.05.2006, Bul. No. 15.

11. Zhang, S., Shi, H.-S., Huang, S.-W. & Zhang, P. (2013) Dehydration Characteristics of Struvite-K Pertaining to magnesium potassium phosphate cement System in Non-Isothermal Condition. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 111. pp. 35–40. doi: 10.1007/s10973-011-2170-9.
12. Shih, K. & Yan, H. (2016) The Crystallization of Struvite and its Analog (K-struvite) from Waste Streams for Nutrient Recycling. *Environmental materials and waste*. pp. 665–686. doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00026-3
13. Siciliano, A., Limonti, C., Curcio, G.M. & Molinari, R. (2020) Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater. *Sustainability*. 12 (18). pp. 1–36. doi: 10.3390/su12187538
14. Pyankova, A.V., Kondrashova, N.B., Val'tsifer, I.V., Shamsutdinov, A.S. & Bormashenko, E.Y. (2021) Synthesis and Thermal Behavior of a Struvite-Based Fine Powder Fire-Extinguishing Agent. *Inorganic Materials*. 57 (10). pp. 1083–1091. doi: 10.1134/S0020168521100125
15. Huo, Y., Valtsifer, I.V., Zamashchikov, V.V., Shamsutdinov, A.S., Kondrashova, N.B. & Pyankova, A.V. (2023) Synthesis and application of hydrophobic silicon dioxide to improve the rheological properties of fire extinguishing compositions based on struvite. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 59. pp. 733–743. doi: 10.1134/S0010508223060096.
16. Valtsifer, I.V., Huo, Y., Zamashchikov, V.V., Shamsutdinov, A.S., Kondrashova, N.B., Sivtseva, A.V., Pyankova, A.V. & Valtsifer, V.A. (2023) Synthesis of Hydrophobic Nanosized Silicon Dioxide with a Spherical Particle Shape and Its Application in Fire-Extinguishing Powder Compositions Based on Struvite. *Nanomaterials*. 13. Art. No. 1186. doi: 10.3390/nano13071186.
17. GOST 27331-87. *Pozharnaya tekhnika. Klassifikatsiya* [Fire equipment. Classification].
18. GOST R 53280.4-2009. *Ustanovki pozharotusheniya avtomaticheskie. Ognnetushashchie veshchestva. Chast' 4. Poroshki ognnetushashchie obshchego naznacheniya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Automatic fire extinguishing installations. Fire extinguishing agents. Part 4. Fire extinguishing powders. General technical requirements and test methods].
19. NPB 170-98. *Poroshki ognnetushashchie obshchego naznacheniya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire extinguishing powders. General technical requirements. Test methods].
20. GOST R 51057-2001. *Tekhnika pozharnaya. Ognnetushiteli perenosnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire equipment. Portable fire extinguishers. General technical requirements. Test methods].
21. Kushchuk, V.A., Popov, A.V., Surovtseva, L.A. & Chumaevsky, V.A. (2000) Patent RU2155088C1. *Ognnetushashchii poroshok mnogotselovogo naznacheniya* [The multi-purpose fire extinguishing powder]. № 99104700/12, appl. 11.03.1999; publication date 27.08.2000, Bul. No. 24.

#### Информация об авторах:

**Вальцифер Игорь Викторович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: valtsifer.i@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-9135-2487.

**Шамсутдинов Артем Шамилович** – кандидат технических наук, научный сотрудник Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: shamsutdinov.a@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-5731-8429.

**Вальцифер Виктор Александрович** – профессор, доктор технических наук, заместитель директора на науке Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: valtsifer.v@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-8671-739X.

**Стрельников Владимир Николаевич** – член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук, директор Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: info@itcras.ru; ORCID: 0000-0003-2538-535X.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

#### Information about the authors:

**Valtsifer Igor V.**, Cand. Sc. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Technical Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russian Federation). E-mail: valtsifer.i@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-9135-2487.

**Shamsutdinov Artem S.**, Cand. Sc. (Engineering), Researcher, Institute of Technical Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russian Federation). E-mail: shamsutdinov.a@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-5731-8429.

**Valtsifer Viktor A.**, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director for Science, 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, Russian Federation). E-mail: valtsifer.v@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-8671-739X.

**Strelnikov Vladimir N.**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Director, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russian Federation). E-mail: info@itcras.ru; ORCID: 0000-0003-2538-535X.

*The authors declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024*

*The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024*