

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 Вальцифер¹, Артем Шамилевич Шамсутдинов²,
Виктор Александрович Вальцифер³, Владимир Николаевич Стрельников⁴

^{1, 2, 3, 4} Институт технической химии УрО РАН – филиал
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

¹ valtsifer.i@itcras.ru

² shamsutdinov.a@itcras.ru

³ valtsifer.v@itcras.ru

⁴ info@itcras.ru

Аннотация. В работе представлена сравнительная оценка удельной пожаротушащей 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 $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$. Показано преимущество введения мелкодисперсных частиц кристаллогидрата ($d < 20 \text{ мкм}$), синтезированных в процессе контролируемого осаждения, в сравнении с аналогами, полученными в результате механического измельчения ($d < 100 \text{ мкм}$).

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. Valtsifer¹, Artem S. Shamsutdinov², Viktor A. Valtsifer³,
Vladimir N. Strelnikov⁴

^{1, 2, 3, 4} 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

¹ valtsifer.i@itcras.ru

² shamsutdinov.a@itcras.ru

³ valtsifer.v@itcras.ru

⁴ 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 $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ is used as a component of fire extinguishing powders. The research has shown the advantage of implementing fine particles of crystalline hydrates ($d < 10 \text{ } \mu\text{m}$) obtained during the controlled precipitation process compared to analogs manufactured by mechanical grinding ($d < 100 \text{ } \mu\text{m}$).

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 zhiznedeyatelnosti – 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 ингибиование, 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 $0,83 \text{ кг/м}^2$. 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, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 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 $0,59 \text{ кг/м}^2$.

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) $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (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 $25 \text{ м}^2/\text{г}$ 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 ~ 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% / 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 энталпии 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°C , а газогенерирующая способность (увеличение объема продуктов сгорания) составляет $0,64 \text{ м}^3$ на 1 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 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 °C			Тушение ОПС (95% NH ₄ H ₂ PO ₄), 1893 °C			Тушение ОПС (65% NH ₄ H ₂ PO ₄ , 30% MgNH ₄ PO ₄ ·6H ₂ O), 1767 °C		
	м ³ /кг	%		м ³ /кг	%		м ³ /кг	%
O ₂	0,042	0,65	O ₂	0,064	1,05	O ₂	0,011	0,17
H ₂	0,020	0,31	H ₂	0,013	0,21	H ₂	0,019	0,29
H ₂ O	0,893	13,5	H ₂ O	1,469	24,00	H ₂ O	1,976	30,74
N ₂	4,780	72,4	N ₂	3,818	62,39	N ₂	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 ₂	0,751	11,38	CO ₂	0,469	7,77	CO ₂	0,194	3,02
			PO ₂	0,189	3,08	PO ₂	0,066	1,02
			P ₂ O ₄	0,002	0,03	P ₂ O ₅	0,015	0,23
			P ₂ O ₅	0,054	0,88	SO ₂	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 м²) исследуемым огнетушащим порошковым составом (масса заряда огнетушителя – 4 кг)

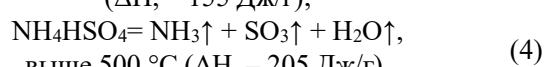
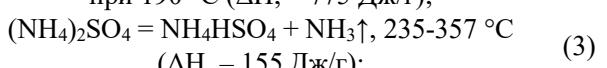
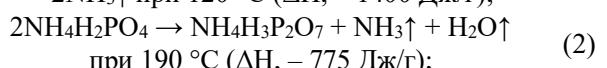
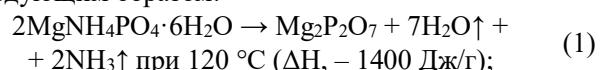
Fig. 1. The extinguishing process of the model fire source of gasoline (area – 1.75 m²) with the tested fire extinguishing powder composition (fire extinguisher charge weight – 4 kg)

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/м². 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:monoаммонийфосфатом, смесью monoаммонийфосфата со струвитом (ОПС КГВ), смесью monoаммонийфосфата 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

Критерий	ОПС КГВ	Аналоги			
		$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
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 ²	0,30	0,55	0,41	0,48	0,59

Таблица 3

Сравнение характеристик исследуемого огнетушащего порошкового состава с аналогами

Критерий	ОПС КГВ	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
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 ²	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 сmonoаммонийфосфатом позволяет достичнуть 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 monoаммонийфосфату, 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 monoаммонийфосфатом, 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 м²/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 monoаммонийфосфата 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 monoаммонийфосфатом, 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., Jaxina 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. DehydrationCharacteristics 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., Замацких 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 / Кущук В.А., Попов А.В., Суровцева 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., Jaxina, 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. Publiation 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 poroshkovyyi 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. P'yankova, 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 pozharotushenija avtomaticheskie. Ognetushashchie veshchestva. Chast' 4. Poroshki ognetushashchie obshchego naznacheniia. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia i metody ispytanii* [Automatic fire extinguishing installations. Fire extinguishing agents. Part 4. Fire extinguishing powders. General technical requirements and test methods].
19. NPB 170-98. *Poroshki ognetushashchie obshchego naznacheniia. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia. Metody ispytanii* [Fire extinguishing powders. General technical requirements. Test methods].
20. GOST R 51057-2001. *Tekhnika pozharnaya. Ognetushiteli perenosnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniia. Metody ispytanii* [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. *Ognetushashchii poroshok mnogoselevogo naznacheniia* [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 Шамилевич – 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