

УДК 614.842/.847

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗВИТИЯ И ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ КЛАССА D1 ПОРОШКОВЫМИ ОГNETУШАЩИМИ СОСТАВАМИ

Денисов Алексей Николаевич, Данилов Михаил Михайлович, Григорьев Алексей Николаевич, Захаревский Виктор Борисович

Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена экспериментальному обоснованию параметров развития (времени свободного развития горения стружки магниевых сплавов по поверхности непрессованной) и тушения пожара (оценки количества сухого молотого флюса, затраченного для тушения непрессованной стружки магниевых сплавов). Учет указанных параметров необходим для прогнозирования развития пожара и планирования сил и средств пожарных подразделений для ликвидации возгорания. Тушение пожаров класса D1, включая алюминий и магний, представляет собой многогранный процесс из-за высокой реакционной способности этих материалов и невозможности использования традиционных огнетушащих веществ, таких как вода и/или диоксид углерода. Подаваемые вещества могут усугубить ситуацию за счет экзотермических реакций с выделением взрывоопасных газов.

Для тушения пожаров класса D1 в основном используются порошковые огнетушащие составы, т. к. они обеспечивают изоляцию горячей поверхности от кислорода и могут быть эффективны при правильном выборе состава и способа применения. Однако, несмотря на прогресс в этой области, поиск оптимальных порошковых составов, способов их применения и подачи в очаг остается актуальной научно-практической задачей.

В рамках исследования была проведена серия лабораторных экспериментов с целью получения минимальных значений огнетушащей концентрации порошкового огнетушащего состава и скорости развития горения.

Результаты исследования рекомендуется использовать в подразделениях пожарной охраны при ликвидации горения, в учебном процессе, а также в научно-исследовательских работах с целью разработки рекомендаций для выбора рационального способа подачи порошковых огнетушащих составов для тушения пожаров класса D1.

Ключевые слова: пожары класса D1, линейная скорость, магний, металл, тушение, порошковый огнетушащий состав, непрессованная стружка, эксперимент, флюс

Для цитирования: Экспериментальное обоснование параметров развития и тушения пожаров класса D1 порошковыми огнетушащими составами // А. Н. Денисов [и др.] // Техносферная безопасность. 2025. № 2 (47). С. 3–12.

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF DEVELOPING AND EXTINGUISHING FIRES OF DI CLASS WITH POWDER EXTINGUISHING COMPOSITIONS

Alexey N. Denisov, Mikhail M. Danilov, Alexey N. Grigoriev, Viktor B. Zakharevsky
SFA of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the experimental substantiation of the parameters of the development (time of free development of combustion of magnesium alloy chips on the surface of unpressed) and fire extinguishing (estimation of the amount of dry ground flux spent for extinguishing unpressed magnesium alloy chips). Accounting for these parameters is necessary for predicting the development of a fire and planning the forces and means of fire departments to eliminate the fire. Extinguishing Class D1 fires, including aluminum and magnesium, is a multifaceted process due to the high reactivity of these materials and the inability to use traditional extinguishing agents such as water and/or carbon dioxide. The supplied substances can aggravate the situation due to exothermic reactions with the release of explosive gases.

To extinguish class D1 fires, powder fire extinguishing compositions are mainly used, since they provide isolation of the burning surface from oxygen and can be effective with the correct choice of composition and method of application. However, despite the progress in this area, the search for optimal powder compositions, methods of their application and supply to the hearth remains an urgent scientific and practical task.

As part of the study, a series of laboratory experiments were conducted to obtain minimum values of the fire extinguishing concentration of the powder fire extinguishing composition and the rate of combustion development.

The results of the study are recommended to be used in fire protection units when extinguishing fires, in the educational process, as well as in research work with the aim of developing recommendations for choosing a rational method of supplying powder fire extinguishing agents for extinguishing class D1 fires.

Keywords: D1 class fires, linear velocity, magnesium, metal, extinguishing, powder extinguishing compound, unpressed chips, experiment, flux

For Citation: Experimental substantiation of parameters of developing and extinguishing fires of Di class with powder extinguishing compositions // A. N. Denisov et al. // Technospheric safety. 2025. № 2 (47). pp. 3–12.

Введение

Проблема возникновения химической реакции (выделение водорода), усиливающей пожар, при подаче в очаг горения воды и других традиционных огнетушащих ве-

ществ известна как практикам пожаротушения, так и научному сообществу [1]. Анализ горения легких порошкообразных металлов (алюминия, магния, бора) в воздухе, водяном паре и диоксиде углерода выявил такие их особенности, как большая химическая

активность, высокое значение тепловыделения в реакциях горения, которые делают эти металлы не менее пожаровзрывоопасными, чем пары углеводородных горючих.

При ограниченном выборе огнетушащих веществ, которые могут быть применены для ликвидации горения металлов, наиболее эффективными являются порошковые огнетушащие составы [2, 3]. Поиск идеального средства тушения постоянно ведется учеными во всех странах мира. Рассматриваются песок, цементный порошок [4], соли, хлопья целлюлозы [5], расширяющийся графит (EG) и бикарбоната калия (KHCO_3) [6], но такое вещество до сих пор не найдено [7–11].

Порошковое пожаротушение — это прием пожаротушения, реализующий традиционный способ прекращения горения (химического торможения) посредством подачи огнетушащего вещества в виде мелкозернистой порошковой смеси. Химически огнетушащие порошки представляют собой соли металлов с различными специальными добавками. Механизм ликвидации горения с их помощью основан на ряде свойств: нагреваясь, порошковая смесь отнимает тепло у очага возгорания, значительно снижая температуру горения; разлагаясь при нагревании, порошковая смесь выделяет негорючие газы, препятствующие воспламенению; смешиваясь с горячим воздухом, порошковая смесь создает вокруг очага возгорания взвесь, препятствующую притоку кислорода; вещества, применяемые для производства порошковых смесей, служат ингибиторами (подавителями) процесса горения.

Материалы и методы

Были идентифицированы количественные показатели развития и тушения пожа-

ров класса D1 порошковыми огнетушащими составами. Для обработки результатов эксперимента использовались методы статистической обработки полученных данных: выборочный средний, дисперсии, моды и медианы; сравнения первичных статистик у нескольких выборок; определение эффективного способа прекращения горения (в стране и за рубежом) иерархическим методом.

Результаты и их обсуждение

Авторами проводились физические эксперименты с целью экспериментального обоснования скорости распространения горения по изделиям из титановых, магниевых, алюминиевых, магниевых-цинковых сплавов, магниевой стружки и оценки огнетушащей способности воды, пенных и порошковых огнетушащих составов, в т. ч. сухого молотого флюса [12], при горении магния и алюминия. Результаты (выборочные) одного из них представлены в настоящей статье.

Эксперимент был проведен на открытом воздухе с контролем метеорологических факторов. Соблюдались следующие условия.

- **Отсутствие осадков.** Эксперимент проводился в сухую погоду, без дождя или других подобных погодных явлений, чтобы исключить влияние влаги на процесс горения и тушения.
- **Низкая скорость ветра.** Скорость ветра была ограничена до 1 м/с, что позволяло минимизировать воздействие внешних аэродинамических факторов на распространение пламени и эффективность тушения.
- **Тип площадки.** Модельный очаг горения располагался на ровной, гори-

зонтальной поверхности (рис. 1). На площадке размещались: квадратный противень из листовой стали¹, магниевая стружка², емкости для измерения объема³, емкость для тушения⁴, секундомер⁵. Эксперимент состоял из подготовки, зажигания, тушения и измерения.

- **Подготовка.** Магниевая стружка равномерно распределяется по противню.
- **Зажигание.** Стружка зажигается с одного из углов противня.
- **Тушение.** Когда огонь распространится на 80 % площади, начинается подача сухого молотого флюса.
- **Измерение.** Секундомер использовался для регистрации времени горения и времени, необходимого для полного тушения [12].

Инициация горения обеспечивала контролируемое начало горения и позволяла отслеживать распространение пламени. Металлическая стружка зажигалась с одного из углов противня с целью контроля распространения горения по площади исследуемого материала (для сравнения линейной скорости распространения горения по поверхности в другом эксперименте). Сухой молотый флюс подавался с расстояния от

¹ Квадратный противень из листовой стали со стороной 500 ± 10 мм, высотой 150 ± 5 мм и толщиной стенок от 2,5 до 3,0 мм (ГОСТ Р 53280.5–2009).

² Используется в качестве горючего материала для эксперимента. Представляет собой легкий металл с высокой реакционной способностью, что делает его сложным для тушения.

³ Две емкости, соответствующие стандарту ГОСТ 20558–82. Первая емкость используется для измерения объема магниевой стружки. Вторая емкость предназначена для измерения объема сухого молотого флюса.

⁴ Также соответствует стандарту ГОСТ 20558–82. Используется для подачи сухого молотого флюса на горящую магниевую стружку.

⁵ Соответствует стандарту ГОСТ 8.423–81. Позволяет точно измерять время эксперимента, включая время горения и время тушения.

600 до 800 мм над поверхностью металла (изменение расстояния в этом диапазоне не влияло на равномерность распределения флюса, на поверхность и время тушения). С такого же расстояния подавался порошок из огнетушителя (ОП-8) (рис. 2).

При отсутствии признаков горения металла подачу порошка прекращали, что обеспечивало локализацию пожара по БУПО при одновременном выполнении условий: в очаге визуально не наблюдается факел пламени и характеризуется тление горючих материалов.

Если в течение 10 мин после окончания предыдущей итерации тушения возникали повторные очаги горения, то производилось дотушивание. Очаг считался ликвидированным, если в течение 10 мин после последнего дотушивания не произошло повторного воспламенения (рис. 3).

Оценка эффективности тушения осуществлялась на основе разницы объема использованного и оставшегося огнетушащего вещества от объема магниевой стружки. В серии экспериментов с тушением непрессованной стружки магниевых сплавов сухим молотым флюсом процентное соотношение объема магниевой стружки к количеству флюса, затраченного для тушения, составило 71 %.

Для анализа развития пожара и определения требуемого количества сил и средств подразделений пожарной охраны необходимо знать линейную скорость распространения горения по поверхности магниевой стружки.

Эксперимент по определению линейной скорости распространения горения состоял из подготовки, зажигания и измерения. На этапе подготовки на ровной бетонной площадке устанавливалась линейка, вдоль



Рис. 1. Подготовка к проведению эксперимента:
1 — противень с непрессованной стружкой магниевых сплавов;
2 — емкость для измерения объема с сухим молотым флюсом

Fig. 1. Preparation for the experiment:
1 — tray with unpressed magnesium alloy chips;
2 — volume measuring vessel with dry ground flux



Рис. 2. Тушение непрессованной стружки магниевых сплавов порошковым огнетушителем ОП-8

Fig. 2. Extinguishing of unpressed magnesium alloy chips with powder fire extinguisher ОП-8



Рис. 3. Фрагмент проведения эксперимента (окончание)

Fig. 3. Fragment of the experiment (end)



Рис. 4. Фрагмент последовательности проведения эксперимента (подготовка):

1 — непрессованная стружка магниевых сплавов; 2 — линейка

Fig. 4. Fragment of the experiment sequence (preparation):

1 — unpressed magnesium alloy chips; 2 — ruler

которой равномерно распределялась полоса магниевой стружки длиной 1 м (рис. 4). После этого с одного края осуществлялась инициация горения, и включался секундомер. По истечении одной минуты горения фиксировалось продвижение огня по полосе магниевой стружки.

В результате получили значения линейной скорости распространения горения

по поверхности непрессованной магниевой стружки, которая составила 0,3 м/мин.

В дальнейшем важно разработать модель, которая будет учитывать зависимость минимальной огнетушащей концентрации порошкового состава не только от объема горючего вещества, но и от времени свободного развития горения (начало тушения). Это позволит минимизировать затраты, по-

высить эффективность пожаротушения, лучше понять динамику пожара и оптимизировать тактику тушения (приемы подачи порошка).

Выводы

Применение порошковых огнетушащих составов обладает рядом преимуществ: стоимость, длительное хранение, тушение пожаров пяти классов из шести, широкий температурный диапазон применения, отсутствие требований к герметизации помещения. Однако имеются и недостатки: неэффективность при тушении веществ,

способных гореть без притока воздуха; химическая активность; затруднение перекачки (традиционными способами); представляют опасность для здоровья человека.

На основе экспериментальных данных было установлено, что линейная скорость распространения горения непрессованной стружки магния и магниевых сплавов составляет 0,3 м/мин, а эффективность огнетушащего вещества молотого флюса 71 %. Эти параметры нужны для определения численности и технической оснащенности подразделения пожарной охраны для организации и осуществления тушения пожаров класса D1.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малинин В. И., Серебренников С. Ю., Бербек А. М. Анализ особенностей горения порошков металлов в смесях с воздухом, водой и диоксидом углерода // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19, № 4. С. 12–17. EDN MSZDBZ.
2. Тушение титана с применением газовых и порошковых огнетушащих составов / С. В. Добровенко [и др.] // Пожарная безопасность. 2011. № 3. С. 40–43. EDN OEXBLV.
3. Sharma T. P., Lal B. B., Singh J. Metal fire extinguishment // Fire Technol. 1987. № 23. pp. 205–229. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01036937>.
4. Yan, Long & Wang, Ning & Xu, Zhisheng. Experimental study on the effectiveness and safety of cement powder on extinguishing metal magnesium fires based on pneumatic conveying technology // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. № 37. pp. 102–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102279>.
5. HAGAUER, Josef & MATLSCHWEIGER, Ulrich & TIPPELREITHER, Christian & HRIBERNIG, Thomas & Lutz, Markus & Lackner, Maximilian. Controlling Magnesium Fires by Cellulose Flake Blanketing and Subsequent Water Mist Cooling. Fire. 2022. № 5 (83). pp. 628–631. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2022.4426>.
6. Huang, An-Chi & Cao, Fang-Chao & Ma, Xin-Yue. A Comparative Approach Study on the Thermal and Calorimetric Analysis of Fire-Extinguishing Powders // Safety. 2024. № 10. 31 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/safety10010031>.
7. Кицак А. И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования

ния частицами порошка активных центров пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29, № 5. С. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.05.89-99>. EDN TSCLQK.

8. Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fires / Jiajia, Xu et al. // Applied Thermal Engineering. 2020. № 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>.

9. Зависимость огнетушащей концентрации порошковых огнетушащих составов от параметров внутреннего пожара / И. Н. Герасимова [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2023. № 1. С. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.25257/FE.2023.1.14-21>. EDN YSYBXA.

10. Прохоренко К. В., Боровков И. А. Противопожарная защита помещений с классом возможного пожара Д1 (магний, титан) модулями порошкового пожаротушения МПП-100 (ОПАН-100) // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Году науки и технологий. Москва, 12–16 мая 2021 г. М. : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2021. С. 357–362. EDN NRCONG.

11. Маклецов, А. К. Современные системы порошкового пожаротушения // Современные проблемы гражданской защиты. 2014. № 1 (10). С. 26–30. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sistemy-poroshkovogo-pozharotusheniya> (дата обращения: 14.04.2025).

12. Лапшин, В. С., Денисов, А. Н. Нахождение удельного расхода огнетушащего вещества необходимого для тушения пожаров в цехах механической обработки металла // Современные тенденции развития образования, науки и технологий : сб. научных трудов по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 30 ноября 2018 года / под общ. ред. А. В. Туголукова. М., 2018. С. 189–193. EDN VOQOSQ.

REFERENCES

1. Malinin V. I., Serebrennikov S. Yu., Berbek A. M. Analysis of the features of combustion of metal powders in mixtures with air, water and carbon dioxide // Pozharovzryvobezопасnost. 2010. Т. 19, № 4. pp. 12–17. EDN MSZDBZ.

2. Titanium extinguishing with the use of gas and powder fire extinguishing compositions / S. V. Dobrovenko et al. // Fire safety. 2011. № 3. pp. 40–43. EDN OEXBLV.

3. Sharma T. P., Lal B. B., Singh J. Metal fire extinguishment // Fire Technol. 1987. № 23. pp. 205–229. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01036937>.

4. Yan, Long & Wang, Ning & Xu, Zhisheng. Experimental study on the effectiveness and safety of cement powder on extinguishing metal magnesium fires based on pneumatic conveying technology // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. № 37. pp. 102–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102279>.

5. HAGAUER, Josef & MATLSCHWEIGER, Ulrich & TIPPELREITHER, Christian & HRIBERNIG, Thomas & Lutz, Markus & Lackner, Maximilian. Controlling Magnesium Fires by Cellulose Flake Blanketing and Subsequent Water Mist Cooling // Fire. 2022. № 5. № 83. pp. 628–631. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2022.4426>.

6. Huang, An-Chi & Cao, Fang-Chao & Ma, Xin-Yue. A Comparative Approach Study on the Thermal and Calorimetric Analysis of Fire-Extinguishing Powders // Safety. 2024. № 10. 31 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/safety10010031>.

7. Kitsak A. I. Efficiency of fire extinguishing by jet systems of powder fire extinguishing in conditions of non-stationarity of heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active flame centers by powder particles // Pozharovzryvzvobezopasnost. 2020. T. 29, № 5. pp. 89–99. DOI: <https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.05.89-99>. EDN TSCLQK.

8. Experimental study of the effectiveness of three kinds of extinguishing agents on suppressing lithium-ion battery fires / Jiajia, Xu et al. // Applied Thermal Engineering. 2020. № 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>.

9. Dependence of extinguishing concentration of powder fire extinguishing compositions on internal fire parameters / I. N. Gerasimova et al. // Fires and emergencies: prevention, elimination. 2023. № 1. pp. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.25257/FE.2023.1.14-21>. EDN YSYBXA.

10. Prokhorenko K. V., Borovkov I. A. Fire protection of premises with possible fire class D1 (magnesium, titanium) by modules of powder fire extinguishing MPP-100 (OPAN-100) // Actual problems of fire safety : proceedings of XXXIII Intern. scientific-practical conf. devoted to the Year of science and technology. Moscow, May 12–16, 2021. M. : FGBU VNIPO MES of Russia, 2021. pp. 357–362. EDN NRCONG.

11. Makletsov, A. K. Modern systems of powder fire extinguishing // Modern problems of civil protection. 2014. № 1 (10). pp. 26–30. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-sistemy-poroshkovogo-pozharotusheniya> (date of application: 14.04.2025).

12. Lapshin V. S., Denisov A. N. Finding the specific consumption of fire extinguishing agent necessary for fire extinguishing in the shops of mechanical metal processing // Modern trends in the development of education, science and technology : a collection of scientific papers on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference Moscow, November 30, 2018 / ed. by A. V. Tugolukov. M., 2018. pp. 189–193. EDN VOQOSQ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Денисов Алексей Николаевич, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры пожарной тактики и службы в составе учебно-научного комплекса пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); РИНЦ ID: 231119; Scopus Author ID: 57221203824, WOS Research ID: AAA-7038-2021; ORCID: 0000-0003-2594-9389; e-mail: dan_aleks@mail.ru

Данилов Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры пожарной тактики и службы в составе учебно-научного комплекса пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); РИНЦ ID: 853796; ORCID: 0000-0003-2732-7620; mdagps@yandex.ru

Григорьев Алексей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной тактики и службы в составе учебно-научного комплекса пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366,

Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN: 1467-6690; e-mail: lcurina@mail.ru

Захаревский Виктор Борисович, старший преподаватель кафедры пожарной тактики и службы в составе учебно-научного комплекса пожаротушения Академии ГПС МЧС России (129366, Российская Федерация, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4); ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey N. Denisov, Dr. Sci. (Eng.), professor, Professor of the Department of Fire Tactics and Service in the Fire Fighting Training and Research Complex of the Fire Fighting Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); RINC ID: 231119; Scopus Author ID: 57221203824; Research ID: AAA-7038-2021; ORCID: 0000-0003-2594-9389; e-mail: dan_aleks@mail.ru

Mikhail M. Danilov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, associate professor Department of Fire Tactics and Service within the Fire Fighting Training and Research Complex of the Fire Fighting Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); RINC ID: 853796; ORCID: 0000-0003-2732-7620; mdagps@yandex.ru

Alexey N. Grigoriev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Department of Fire Tactics and Service in the Fire Fighting Training and Research Complex of the Fire Fighting Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0009-0005-2199-1434; SPIN: 1467-6690; e-mail: lcurina@mail.ru

Victor B. Zakharevsky, Senior Lecturer Department of Fire Tactics and Service within the Fire Fighting Training and Research Complex of the Fire Fighting Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (4 Borisa Galushkina St., Moscow, 129366, Russian Federation); ORCID: 0009-0007-2393-557X; SPIN: 8036-6712; e-mail: zvb_ptis_agps@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2025

Одобрено после рецензирования 29.04.2025

Принята к публикации 15.06.2025