

Экспериментальные исследования способа подачи газопорошкового огнетушащего вещества с помощью щелевого насадка при тушении пролива горючей жидкости

Александра Борисовна Саенкова ✉

ООО «Каланча Инжиниринг», г. Сергиев Посад, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена изучению методов повышения эффективности тушения пожаров, вызванных проливами горючих жидкостей. Цель работы — определение оптимального способа подачи газопорошкового огнетушащего вещества (ГПОВ) через щелевой насадок распыления. В задачи исследования входило изучение влияния расположения насадка, интенсивности подачи ГПОВ и площади очага возгорания на эффективность тушения.

Методы. В исследовании применялись экспериментальные методы, включающие моделирование очагов возгорания различной конфигурации. Для подачи ГПОВ использовался щелевой насадок распыления, закрепленный на определенном расстоянии от борта модельного очага. Коэффициент диафрагмирования насадка рассчитывался как соотношение площади боковой прорези к площади проходного сечения трубопровода подачи ГПОВ.

Результаты. Экспериментальные исследования показали, что тушение пролива горючей жидкости достигается при интенсивности подачи ГПОВ более $1,4 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$. Верная струя, создаваемая щелевым насадком, должна полностью перекрыть площадь возгорания.

Область применения результатов. Полученные результаты могут быть использованы для разработки более эффективных систем пожаротушения для промышленных объектов, где возможны проливы горючих жидкостей. Результаты исследования имеют практическую значимость для повышения безопасности объектов нефтегазовой отрасли.

Выводы. Исследование показало эффективность щелевого насадка распыления для тушения проливов горючих жидкостей. Для дальнейшего повышения эффективности тушения необходимо учитывать расположение насадка, массовую скорость подачи и интенсивность ГПОВ. Перспективным направлением является изучение механизма формирования зоны с огнетушащей концентрацией ГПОВ над поверхностью пролива.

Ключевые слова: пожаротушение; интенсивность подачи; экспериментальное исследование

Для цитирования: Саенкова А.Б. Экспериментальные исследования способа подачи газопорошкового огнетушащего вещества с помощью щелевого насадка при тушении пролива горючей жидкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 5. С. 63-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.63-70

✉ Саенкова Александра Борисовна, e-mail: a.saenkova@gmail.com

Experimental study of gas-powder fire extinguishing agent application via a slotted nozzle for pool fire suppression

Alexandra B. Saenkova ✉

Kalancha Engineering LLC, Sergiev Posad, Russian Federation

ABSTRACT

Subject. The article addresses methods for enhancing the effectiveness of extinguishing fires caused by spills of flammable liquids. The study aims to determine the optimal parameters for supplying a gas-powder fire-extinguishing agent (GPFEA) through a slotted spray nozzle.

Objectives. The objectives of the research include analysing the influence of the nozzle position, GPFEA discharge rate, and fire area size on the extinguishing efficiency.

Methods. Experimental studies were conducted using simulated fire sources of various configurations. A slotted spray nozzle, positioned at a fixed distance from the edge of the model fire source, was employed to supply the GPFEA. The diaphragm coefficient of the nozzle was determined as the ratio of the lateral slot area to the cross-sectional area of the GPFEA supply line.

Results. The experiments demonstrated that effective extinguishing of flammable liquid spills is achieved when the GPFEA discharge intensity exceeds $1.4 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. The fan-shaped jet produced by the slotted nozzle must completely cover the fire area to ensure full suppression.

Practical significance. The obtained results can be applied in the development of more efficient fire suppression systems for industrial facilities where flammable liquid spills may occur. The findings are of practical relevance for improving the safety of oil and gas industry facilities.

Conclusions. The study confirmed the effectiveness of using a slotted spray nozzle for extinguishing flammable liquid spills. To further enhance extinguishing performance, it is essential to consider the nozzle orientation, mass flow rate, and discharge intensity of the GPFEA. Future research should focus on studying the formation mechanism of the zone with a fire-extinguishing concentration of the GPFEA above the spill surface.

Keywords: fire extinguishing; discharge intensity; experimental study; gas-powder fire-extinguishing agent; slotted nozzle

For citation: Saenkova A.B. Experimental study of gas-powder fire-extinguishing agent application via a slotted nozzle for pool fire suppression. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(5):63-70. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.05.63-70 (rus).

✉ Alexandra Borisovna Saenkova, e-mail: a.saenkova@gmail.com

Введение

Современные исследования порошковых огнетушащих средств направлены на повышение их эффективности при тушении воспламенения различных горючих веществ и улучшение эксплуатационных свойств.

Создание композитных составов с добавками $Mg(OH)_2$ [1–3], $NH_4Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ [4], SiO_2 и хитозан (chitosan) [5] позволяет сократить время тушения и расход по сравнению с уже существующими на рынке огнетушащими порошками. В работе [6] более подробно рассмотрен механизм тушения порошка с добавкой $Mg(OH)_2$. Модификация поверхности порошка позволяет повысить водоотталкивающие свойства порошка [7]. В настоящее время разрабатываются порошки, имеющие одновременно гидрофобные и олеофобные свойства, для тушения пожаров пролива и снижения риска повторного воспламенения [8–10].

Однако существующие способы и средства подачи огнетушащих порошков при тушении пожаров зачастую не позволяют использовать их эффективно [11]. Поэтому важно изучать не только свойства огнетушащих порошков, но и способы их подачи при применении в серийно выпускаемых модулях порошкового и газопорошкового пожаротушения.

Авторы в работах [12–16] рассматривают подачу порошкового огнетушащего вещества через сверхзвуковые насадки с целью оптимизации конструкции насадка для повышения эффективности пожаротушения. Исследователи отмечают влияние геометрии сопла [12, 14], давления подачи [13, 16] на длину струи и распределения твердых частиц порошка по струе. Авторы в работе [13] отмечают следующие зависимости: увеличение размера частиц до 10–20 мкм уменьшает скорость в ядре струи и уменьшает радиальную диффузию; увеличение массового расхода порошка снижает скорость частиц в ядре струи, но увеличивает их радиальную диффузию; увеличение давления в сопле приводит к увеличению скорости частиц и длины ядра струи.

Автор в работах [17–20] рассматривает подачу порошка с помощью импульсных порошковых моду-

лей, расположенных непосредственно над очагом пожара. Динамика частиц огнетушащего порошка при таком способе подачи зависит от множества факторов: мощности очага пожара, подъемной силы нагретых газов, сопротивления воздуха, интенсивности подачи порошка, скорости частиц и их теплофизических свойств. При некоторой высоте расположения модуля пожаротушения часть частиц порошка не будет обладать достаточной скоростью, чтобы достичь очага возгорания [20].

Одним из способов тушения пролива горючей жидкости является создание над ее поверхностью слоя с огнетушащей концентрацией порошка. Струя, создаваемая с помощью сопел круглого сечения, имеет коническую форму и не может перекрыть всю поверхность пролива одновременно. При истечении среды из кольцевого сопла образуется веерная струя [21]. На практике такую струю можно получить при истечении среды из узкой щели в боковой поверхности трубы, один конец которой заглушен. Гипотеза экспериментального исследования состоит в том, что с помощью щелевого насадка можно создать струю ГПОВ над поверхностью пролива. Скорость истечения ГПОВ будет выше скорости восходящих потоков пламени, а время работы модуля достаточным для тушения. При этом над всей площадью возгорания будет формироваться зона с концентрацией ГПОВ не менее огнетушащей.

Цель исследования состоит в определении оптимального способа подачи при тушении сплошного пролива горючей жидкости через щелевой насадок распыления. Задачи исследования состоят в определении оптимального расположения насадка распыления относительно борта модельного очага, экспериментального определения площади очага, который может быть потушен с помощью такого насадка распыления и интенсивности подачи газопорошкового огнетушащего вещества.

Методика исследования

Общая схема испытаний представлена на рис. 1. Для исследования использовались модельные очаги

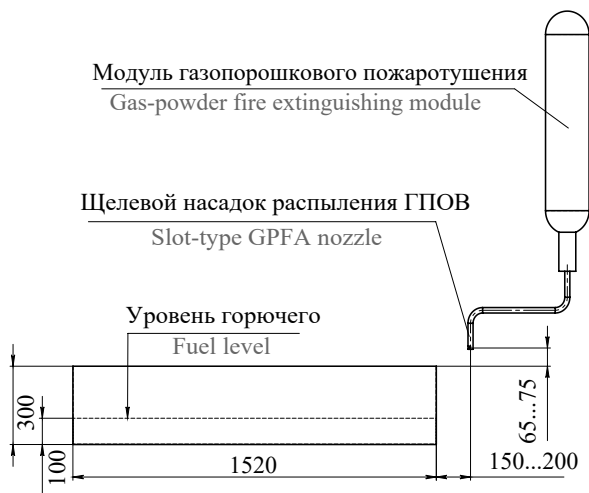


Рис. 1. Общая схема испытания
Fig. 1. General test layout

различной конфигурации: прямоугольный очаг с размерами 1 × 2 м, квадратный очаг с размерами 1,52 × 1,52 м и стандартные модельные очаги 89В, 144В и 233В по ГОСТ Р 53286–2009¹. Насадок распыления закреплялся на расстоянии от борта модельного очага. Насадок распыления (рис. 2, 3) через трубопровод соединялся с модулем газопорошкового пожаротушения. Коэффициент диафрагмирования насадка определялся как соотношение площади боковой прорези щелевого насадка к площади проходного сечения трубопровода подачи ГПОВ. Глубина прорези r щели составляла половину диаметра трубы. Ширина прорези h выбиралась с таким условием, чтобы коэффициент диафрагмирования насадка составлял 0,7.

$$k_d = \frac{S_{щ}}{S_{тр}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r \cdot h}{\pi \cdot r^2} = \frac{h}{r} \approx 0,7, \quad (1)$$

где k_d — коэффициент диафрагмирования насадка распыления;

$S_{щ}$ — площадь боковой прорези щелевого насадка распыления, м²;

$S_{тр}$ — площадь проходного сечения трубопровода подачи ГПОВ, м²;

r — радиус внутреннего сечения трубопровода подачи ГПОВ, м;

h — ширина боковой прорези щелевого насадка распыления ГПОВ, м.

Подача ГПОВ велась из одного щелевого насадка.

Дополнительно были проведены испытания, в которых подача ГПОВ велась через два насадка распыления, расположенных напротив друг друга и соединенных единым трубопроводом с модулем пожаротушения.

¹ ГОСТ Р 53286–2009. Техника пожарная. Установки порошкового пожаротушения автоматические. Модули. Общие технические требования. Методы испытаний.

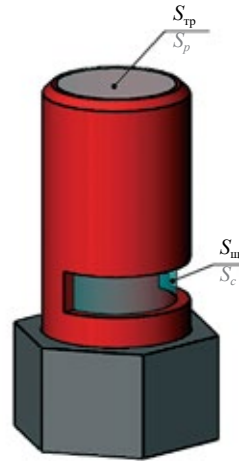


Рис. 2. Общий вид щелевого насадка распыления ГПОВ
Fig. 2. General design of the slot-type GPFEA nozzle

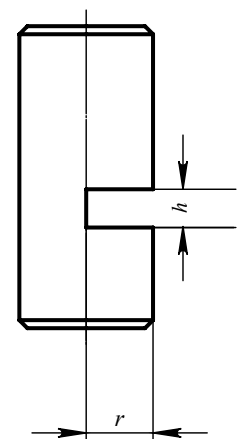


Рис. 3. Вид сбоку щелевого насадка распыления ГПОВ
Fig. 3. Side view of GPFEA slot-type spray nozzle

Для определения времени выхода ГПОВ и давления подачи ГПОВ на трубопроводе перед насадком распыления был установлен датчик давления, данные с которого с помощью преобразователя регистрировались и обрабатывались на ЭВМ.

В модельный очаг заливалась вода и затем горячая жидкость. Расстояние от поверхности жидкости до края борта составляло 100–150 мм. Горючее поджигалось с помощью факела, и через 60 с свободного горения вручную запускался модуль пожаротушения. По результатам фиксировались тушение и отсутствие повторного воспламенения, велась видеосъемка.

Результаты

Был проведен ряд испытаний, в которых менялись масса ГПОВ и, соответственно, проходное сечение трубопровода ГПОВ и высота щели насадка распыления. Для увеличения интенсивности подачи

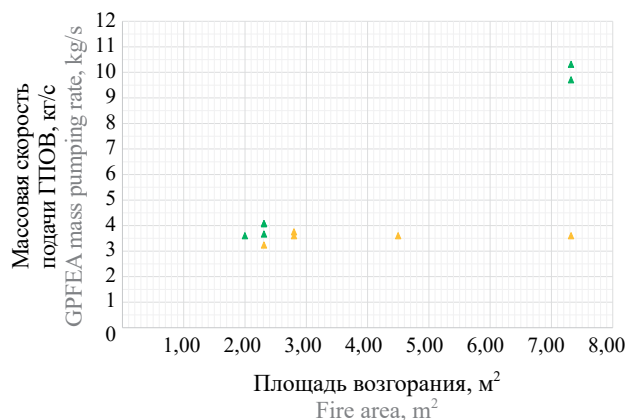


Рис. 4. Зависимость массовой скорости подачи ГПОВ от площади возгорания: ▲ возгорание потушено; ▲ возгорание не потушено

Fig. 4. Dependence of the GPFEA mass pumping rate on the fire area: ▲ fire extinguished; ▲ fire not extinguished

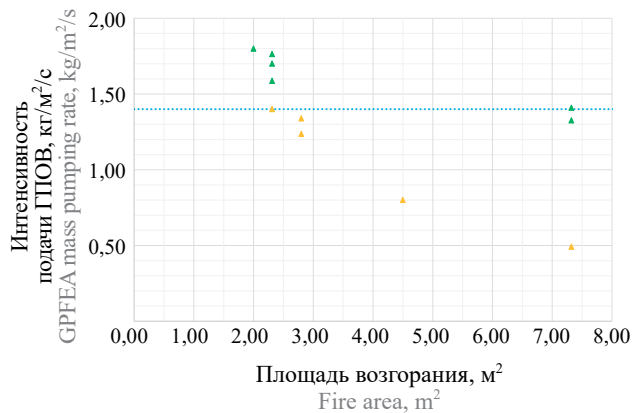


Рис. 5. Зависимость интенсивности подачи ГПОВ от площади возгорания: ▲ возгорание потушено; ▲ возгорание не потушено

Fig. 5. Dependence of the GPFEA discharge rate on the fire area: ▲ fire extinguished; ▲ fire not extinguished



Рис. 7. В испытании № 3 наблюдалось горение у дальнего от насадка борта

Fig. 7. During Test 3, combustion was observed near the far edge of the wall (farthest from the nozzle)



a



b



c

Рис. 6. Испытание № 9: тушение пожара пролива: *a* — начало подачи ГПОВ; *b* — раскрытие струи ГПОВ над очагом пожара; *c* — ликвидация возгорания

Fig. 6. Test 9: pool fire extinguishing: *a* — onset of GPFA pumping; *b* — GPFA flow separation over the fire seat; *c* — fire suppression



a



b



c

Рис. 8. Испытание с двумя насадками распыления ГПОВ: *a* — начало подачи ГПОВ; *b* — увеличение объема пламени над очагом пожара; *c* — ликвидация возгорания

Fig. 8. Dual nozzle GPFEA spray test: *a* — onset of GPFEA pumping; *b* — flame increase over the fire seat; *c* — fire suppression

Результаты огневых испытаний
Fire test results

Наименование параметра Parameter	Ед. изм. Measurement unit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ликвидация возгорания Fire suppression	–	Да Yes	Нет No	Нет No	Нет No	Нет No	Да Yes	Да Yes	Нет No	Да Yes	Да Yes	Да Yes
Модельный очаг Model fire scenario	–	Прямоугольный очаг 1 × 2 м Rectangular fire pan 1 × 2 m	Модельный очаг 233В Model fire scenario 233В	Модельный очаг 144В Model fire scenario 144В	Модельный очаг 89В Model fire scenario 89В	Модельный очаг 89В Model fire scenario 89В	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Квадратный очаг 1,52 × 1,52 м Square fire pan 1,52 × 1,52 m	Модельный очаг 233В Model fire scenario 233В	Модельный очаг 233В Model fire scenario 233В
Площадь модельного очага Standard model fire area	м ² m ²	2,00	7,32	4,5	2,8	2,8	2,31	2,31	2,31	2,31	7,32	7,32
Масса ГПОВ GPFEA mass	кг kg	9	9	9	9	9	11	5,5	5,5	11	33	33
Условный диаметр трубопровода подачи и насадка распыления ГПОВ Nominal diameter of supply pipeline and GPFEA nozzle	–	15	15	15	15	15	15	15	15	15	25	25
Время выхода ГПОВ GPFEA discharge time	с s	2,5	2,5	2,5	2,4	2,5	2,7	1,5	1,7	2,8	3,2	3,4
Массовая скорость ГПОВ GPFEA mass flow rate	кг/с kg/s	3,6	3,6	3,6	3,75	3,4	4,07	3,67	3,24	3,93	10,31	9,71
Интенсивность подачи ГПОВ GPFEA discharge rate	кг/м ² /с kg/m ² /s	1,8	0,49	0,8	1,34	1,24	1,76	1,59	1,40	1,70	1,41	1,33

несколько модулей объединялись общим коллектором, площадь проходного сечения которого была равна сумме площадей сечений выходных отверстий модулей. Результаты представлены в таблице и на рис. 4, 5. Массовая скорость ГПОВ определялась как отношение массы ГПОВ к времени выхода ГПОВ. Интенсивность подачи ГПОВ — отношение массы ГПОВ к времени выхода ГПОВ и к площади возгорания. На рис. 6 представлены кадры работы модуля пожаротушения. Веерная струя от щелевого насадка полностью перекрывает площадь возгорания. Происходит отсечение горящей части пламени за счет скорости истечения газопорошковой смеси. Горящая часть поднимается вверх и догорает в атмосфере. Порошок поступает в зону горения, смешивается с парами горючей жидкости и воздухом, ингибирует реакцию горения. Облако ГПОВ при перекрытии площади возгорания препятствует поступлению теплового потока от пламени к горючей жидкости и испарению горючих паров с поверхности жидкости. В опытах 2–5 было визуально видно, что у дальнего относительно насадка распыления борта горение не прекращалось (рис. 7). Можно предположить, что скорость струи ГПОВ на границе борта снизилась, газопорошковая смесь начала подниматься восходящими потоками пламени и не произошло механического срыва пламени. При этом огнетушащая концентрация в данной зоне также не была достигнута.

При испытаниях, когда подача ГПОВ осуществлялась из двух насадков распыления, направленных навстречу друг другу, произошло увеличение объема пламени (рис. 8). Две струи ГПОВ столкнулись над поверхностью горючей жидкости, при этом часть ГПОВ направилась вниз и произошло воздействие

струи ГПОВ на поверхность горючей жидкостью. Произошло «раздувание» паровоздушной смеси, увеличение объема пламени. За счет того, что в зону горения поступило ГПОВ, возгорание было ликвидировано. Подобная картина наблюдалась в двух проведенных опытах.

Выводы

Тушение пожара пролива горючей жидкости происходит при интенсивности подачи ГПОВ более $1,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Щелевой насадок распыления демонстрирует высокую эффективность при тушении проливов горючих жидкостей. Веерная струя, создаваемая таким насадком распыления, способна полностью перекрыть площадь возгорания, что подтверждается экспериментальными данными.

Расположение насадка относительно борта очага играет важную роль в эффективности тушения. В некоторых случаях горение у дальнего относительно насадка распыления борта продолжалось.

Столкновение двух струй ГПОВ и воздействие части порошка на поверхность горения приводит к увеличению объема пламени.

Эффективность тушения зависит от массовой скорости подачи и интенсивности подачи ГПОВ. При этом необходимо учитывать площадь очага, его форму и конструктивные особенности насадка.

Необходимы дальнейшие исследования для определения зависимости скорости распространения струи ГПОВ над поверхностью горения от давления перед насадком распыления ГПОВ и механизма формирования над поверхностью пролива зоны с огнетушащей концентрацией ГПОВ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Du D., Shen X., Feng L., Hua M., Pan X. Efficiency characterization of fire extinguishing compound superfine powder containing $\text{Mg}(\text{OH})_2$ // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. No. 57. Pp. 73–80. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.016. EDN RUQSYR.
2. Hangchen L., Xiaohoi Sh., Xinxin G., Shunchao L., Han Zh., Chendong Zh. et al. High efficiency of the $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4/\text{Mg}(\text{OH})_2$ composite for guaranteeing safety of wood production // Journal Loss Prevention in the Process Industries. 2021. No. 69. P. 104364. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104364. EDN VHGXNS.
3. Wang L., Du Sh., Zhou Zh., Guo Y., Yang Q., Yao S. et al. Enhanced Fire-Extinguishing Performance and Synergy Mechanism of HM/DAP Composite Dry Powder // Materials. 2025. No. 18 (3). P. 533. DOI: 10.3390/ma18030533. EDN YBTTRO.
4. Li X., Zhang M., Zhou Zh., Zhu Yu., Du K., Zhou X. A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium-ion battery fires // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. No. 42. P. 102756. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102756. EDN PNVOVS.
5. Le G.H., Thanh D.A., My Ph.T.H., Pham T.T.T., Quan T.T.T., Nguen Q.M. et al. Synthesis of magnesium hydroxide powder and dry powders for application in extinguishing petroleum fires // Vietnam Journal of Chemistry. 2024. No. 62 (S1). Pp. 69–35. DOI: 10.1002/vjch.202300279. EDN UHSOQE.
6. Hu W., Yu R., Chang Z., Liu X., Tan Z. The fire extinguishing mechanism of ultrafine composite dry powder agent containing $\text{Mg}(\text{OH})_2$ // International Journal of Quantum Chemistry. 2021. No. 121 (24). P. e26810. DOI: 10.1002/qua.26810. EDN CWRTJT.

7. Wang X. Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent // Journal of Physics: Conference Series. 2023. No. 2539 (1). P. 012091. DOI: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091. EDN OTNIJS.
8. Zhao J., Lu S., Fu Y., Shahid M.U., Zhang H. Application of ultra-fine dry chemicals modified by POTS/OBS for suppressing aviation kerosene pool fire // Fire Safety Journal. 2020. No. 118. P. 103148. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103148. EDN DBZXIS.
9. Zhao J., Fu Y., Yin Z., Xing H., Lu S., Zhang H. Preparation of hydrophobic and oleophobic fine sodium bicarbonate by gel-sol-gel method and enhanced fire extinguishing performance // Materials & Design. 2020. No. 186. P. 108331. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108331. EDN DQMVLJ.
10. Liu Yu., Chen R., Zhixuan W., Zhang R., Jing H., Yu D. et al. Effects of thermal aging on the performance of ordinary and novel superhydrophobic and oleophobic ultra-fine dry powder extinguishing agent // Scientific Reports. 2025. No. 15. P. 3668. DOI: 10.1038/s41598-025-87718-w
11. Frederic H., Hoorelbeke P., Roosendans D., Dutertreb A., Helschge G. An Experimental Investigation on Fire Extinguishing Powder Efficiency // Chemical Engineering Transaction. 2020. No. 82. Pp. 241–246. DOI: 10.3303/CET2082041
12. Ge H., Zhao P., Zhu C., Zhang X., Liu Yu. Analysis of the Influence of Nozzle Structure of Dry Powder Fire Extinguishing System on Supersonic Jet Characteristics // Machines. 2024. No. 12 (8). P. 553. DOI: 10.3390/machines12080553. EDN QRQXOW.
13. Ge H., Zhang X., Liu Y. Numerical and Experimental Study on the Jet Behavior of Ultrafine Dry Powder Based on a Supersonic Nozzle // ACS Omega. 2024. No. 9 (46). Pp. 46574–46587. DOI: 10.1021/acsomega.4c08542. EDN QWMAWP.
14. Chu S., Chen T., Gan Y., Liu Y., Zheng W., Tang Ya. et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Gas–Solid Two-Phase Spraying of Dry Powder Fire-Extinguishing System Based on Fire-Extinguishing Inspection Robot // Processes. 2024. No. 12 (6). P. 1239. DOI: 10.3390/pr12061239. EDN WMHVEY.
15. Zhang L., Feng Y., Wu S., Jia H. Numerical Study of the Effect of Primary Nozzle Geometry on Supersonic Gas-Solid Jet of Bypass Injected Dry Powder Fire Extinguishing Device // Fire. 2024. No. 7 (2). P. 45. DOI: 10.3390/fire7020045. EDN RSOTGJ.
16. Zhang L., Wu S., Feng Y., Guan H. Numerical Study of a Supersonic Nozzle Gas Jet Laden with a Dry Powder Fire-extinguishing Agent Injected from a Bypass Injector // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2025. No. 18 (4). Pp. 1098–1114. DOI: 10.47176/jafm.18.4.2840
17. Кицак А.И. Эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2020. № 29 (5). С. 89–99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99. EDN TSCLQK.
18. Кицак А.И. Влияние нестационарности процесса теплопередачи на эффективность тушения пожара подкласса А1 модулем порошкового пожаротушения // Пожарная безопасность. 2019. № 3 (96). С. 78–84. EDN JK1YQG.
19. Кицак А.И., Палубец С.М., Надточий Д.Н. Анализ процесса гетерогенного ингибирования активных центров пламени струйной горячей системы частицами огнетушащего порошка в нестационарных условиях взаимодействия // Чрезвычайные ситуации: Предупреждение и ликвидация. 2021. № 1 (49). С. 127–136. EDN OHDOFP.
20. Кицак А.И. Динамика частиц огнетушащего порошка на пути к очагу пожара при импульсном способе подачи его в зону горения // ВІТР. 2018. Vol. 49. Issue 1. Pp. 76–85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.72018
21. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. Репринтное воспроизведение издания 1960 г. М. : ЭКОЛИТ, 2011. 715 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009477581/?ysclid=mg55mxo5oc396328601

REFERENCES

1. Du D., Shen X., Feng L., Hua M., Pan X. Efficiency characterization of fire extinguishing compound superfine powder containing Mg(OH)₂. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:73-80. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.08.016. EDN RUQSYR.
2. Hangchen L., Xiaohoi Sh., Xinxin G., Shunchao L., Han Zh., Chendong Zh. et al. High efficiency of the NH₄H₂PO₄/Mg(OH)₂ composite for guaranteeing safety of wood production. *Journal Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 69:104364. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104364. EDN VHGXNS.
3. Wang L., Du Sh., Zhou Zh., Guo Y., Yang Q., Yao S. et al. Enhanced Fire-Extinguishing Performance and Synergy Mechanism of HM/DAP Composite Dry Powder. *Materials*. 2025; 18(3):533. DOI: 10.3390/ma18030533. EDN YBTTR0.
4. Li X., Zhang M., Zhou Zh., Zhu Yu., Du K., Zhou X. A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium-ion battery fires. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023; 42:102756. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102756. EDN PNVOVS.

5. Le G.H., Thanh D.A., My Ph.T.H., Pham T.T.T., Quan T.T.T., Nguen Q.M. et al. Synthesis of magnesium hydroxide powder and dry powders for application in extinguishing petroleum fires. *Vietnam Journal of Chemistry*. 2024; 62(S1):69-35. DOI: 10.1002/vjch.202300279. EDN UHSEOQ.
6. Hu W., Yu R., Chang Z., Liu X., Tan Z. The fire extinguishing mechanism of ultrafine composite dry powder agent containing $Mg(OH)_2$. *International Journal of Quantum Chemistry*. 2021; 121(24):e26810. DOI: 10.1002/qua.26810. EDN CWRTJT.
7. Wang X. Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023; 2539(1):012091. DOI: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091. EDN OTNIJS.
8. Zhao J., Lu S., Fu Y., Shahid M.U., Zhang H. Application of ultra-fine dry chemicals modified by POTS/OBS for suppressing aviation kerosene pool fire. *Fire Safety Journal*. 2020; 118:103148. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103148. EDN DBZXIS.
9. Zhao J., Fu Y., Yin Z., Xing H., Lu S., Zhang H. Preparation of hydrophobic and oleophobic fine sodium bicarbonate by gel-sol-gel method and enhanced fire extinguishing performance. *Materials & Design*. 2020; 186:108331. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108331. EDN DQMVLJ.
10. Liu Yu., Chen R., Zhixuan W., Zhang R., Jing H., Yu D. et al. Effects of thermal aging on the performance of ordinary and novel superhydrophobic and oleophobic ultra-fine dry powder extinguishing agent. *Scientific Reports*. 2025; 15:3668. DOI: 10.1038/s41598-025-87718-w
11. Frederic H., Hoorelbeke P., Roosendans D., Dutertreb A., Hellschge G. An Experimental Investigation on Fire Extinguishing Powder Efficiency. *Chemical Engineering Transaction*. 2020; 82:241-246. DOI: 10.3303/CET2082041
12. Ge H., Zhao P., Zhu C., Zhang X., Liu Yu. Analysis of the Influence of Nozzle Structure of Dry Powder Fire Extinguishing System on Supersonic Jet Characteristics. *Machines*. 2024; 12(8):553. DOI: 10.3390/machines12080553. EDN QRQXOW.
13. Ge H., Zhang X., Liu Y. Numerical and Experimental Study on the Jet Behavior of Ultrafine Dry Powder Based on a Supersonic Nozzle. *ACS Omega*. 2024; 9(46):46574-46587. DOI: 10.1021/acsomega.4c08542. EDN QWMAWP.
14. Chu S., Chen T., Gan Y., Liu Y., Zheng W., Tang Ya. et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Gas-Solid Two-Phase Spraying of Dry Powder Fire-Extinguishing System Based on Fire-Extinguishing Inspection Robot. *Processes*. 2024; 12(6):1239. DOI: 10.3390/pr12061239. EDN WMHVEY.
15. Zhang L., Feng Y., Wu S., Jia H. Numerical Study of the Effect of Primary Nozzle Geometry on Supersonic Gas-Solid Jet of Bypass Injected Dry Powder Fire Extinguishing Device. *Fire*. 2024; 7(2):45. DOI: 10.3390/fire7020045. EDN RSOTGJ.
16. Zhang L., Wu S., Feng Y., Guan H. Numerical Study of a Supersonic Nozzle Gas Jet Laden with a Dry Powder Fire-extinguishing Agent Injected from a Bypass Injector. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2025; 18(4):1098-1114. DOI: 10.47176/jafm.18.4.2840
17. Kitsak A.I. Efficiency of fire suppression systems using dry powder sprays to extinguish fires amid non-steady heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active centers by powder particles. *Pozharovzryvbezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(5):89-99. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.05.89-99. EDN TSCLQK. (rus).
18. Kitsak A.I. The influence of nonstationarity of the process of heat transfer on the efficiency of extinguishing subclass A1 fires by powder fire extinguishing module. *Fire safety*. 2019; 3(96):78-84. EDN JKIQG.
19. Kitsak A.I., Palubets S.M., Nadochiy D.N. Analysis of the process of heterogeneous inhibition of the active flame centers of a jet burning system by fire extinguishing powder particles under nonstationary conditions of interaction. *Emergency situations: Prevention and elimination*. 2021; 1(49):127-136. EDN OHDOPF. (rus).
20. Kitsak A.I. The dynamics of dry chemical powder particles towards the fire source during their pulse feeding into the combustion zone. *BiTP*. 2018; 49(1):76-85. DOI: 10.12845/bitp.49.1.2018.72018 (rus).
21. Abramovich G.N. *Theory of turbulent jets. Reprint of the 1960 edition*. Moscow, EKOLIT, 2011; 715. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_009477581/?ysclid=mgs5mxc5oc396328601 (rus).

Поступила 28.09.2025, после доработки 07.10.2025;

принята к публикации 10.10.2025

Received September 28, 2025; Received in revised form October 07, 2025;

Accepted October 10, 2025

Информация об авторе

САЕНКОВА Александра Борисовна, главный конструктор, ООО «Каланча Инжиниринг», Россия, 141300, г. Сергиев Посад, Скобяное ш., 3; ORCID: 0000-0001-6502-6904; РИНЦ ID: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; e-mail: a.saenkova@gmail.com

Information about the author

Alexandra B. SAENKOVA, Chief Designer, Kalancha Engineering LLC, Skobyano highway, 3, Sergiev Posad, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6502-6904; ID RSCI: 1108799; ResearcherID: IUP-7179-2023; e-mail: a.saenkova@gmail.com