

Научная статья

УДК 614.844.1; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-139-152

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОБИЛЬНОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

✉Сытдыков Максим Равильевич;

Шилов Александр Геннадьевич;

Лебедев Андрей Юрьевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉[sytdykov@igps.ru](mailto:sytdykov@igps.ru)

*Аннотация.* В рамках исследования рассматриваются актуальные аспекты обеспечения пожарной безопасности промышленных объектов нефтеперерабатывающего комплекса, а также транспортных систем различного типа (автомобильных, железнодорожных и морских).

Предметом исследования выступает инновационная мобильная универсальная установка пожаротушения, функционирующая на основе газопоршневого метода вытеснения огнетушащего вещества.

Методологическая база исследования включает комплексный анализ экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний установки. Разработанные математические модели позволяют осуществлять прогнозирование эффективности работы мобильной универсальной установки пожаротушения при использовании различных типов огнетушащих веществ, а также проводить оценку ее газогидродинамических характеристик.

В ходе исследования проведено компьютерное моделирование процесса ликвидации горения модельного очага пожара класса А, результаты которого подтвердили высокую эффективность применения мобильной универсальной установки пожаротушения.

Полученные данные свидетельствуют о существенном потенциале исследуемой технологии в контексте повышения пожарной устойчивости промышленных и транспортных объектов.

*Ключевые слова:* мобильная установка, универсальная установка пожаротушения, оценка эффективности, моделирование

**Для цитирования:** Сытдыков М.Р., Шилов А.Г., Лебедев А.Ю. Оценка эффективности мобильной универсальной установки пожаротушения на основе результатов моделирования // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 139–152. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-139-152.

Scientific article

## **EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A MOBILE UNIVERSAL FIRE EXTINGUISHING SYSTEM BASED ON SIMULATION RESULTS**

✉Sytdykov Maxim R.;

Shilov Alexander G.;

Lebedev Andrey Yu.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉[sytdykov@igps.ru](mailto:sytdykov@igps.ru)

*Abstract.* Within the framework of the research, current aspects of ensuring fire safety of industrial facilities of the oil refining complex, as well as transportation systems of various types (road, railway, and maritime), are examined.

The subject of the research is an innovative mobile universal fire extinguishing installation, operating based on the gas-piston method of fire extinguishing agent displacement.

The methodological basis of the research includes a comprehensive analysis of experimental data obtained during installation testing. The developed mathematical models enable prediction of the mobile universal fire extinguishing installation operational efficiency when using different types of fire extinguishing agent, as well as assessment of its gas-hydrodynamic characteristics.

During the research, computer modeling of the fire extinguishing process for a model fire source of class A was conducted, the results of which confirmed the high efficiency of the mobile universal fire extinguishing installation application.

The obtained data indicate significant potential of the studied technology in the context of enhancing fire resistance of industrial and transportation facilities.

**Keywords:** mobile installation, universal fire extinguishing installation, efficiency assessment, modeling

**For citation:** Sytdykov M.R., Shilov A.G., Lebedev A.Yu. Evaluation of the effectiveness of a mobile universal fire extinguishing system based on simulation results // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 2 (74). P. 139–152. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-139-152.

### Введение

В рамках научного исследования авторами была проведена комплексная многопараметрическая интегральная оценка эффективности функционирования мобильной универсальной установки пожаротушения (МУУПТ) с применением газопоршневого метода вытеснения огнетушащего вещества (ОТВ) [1].

В ходе экспериментального моделирования были воспроизведены и проанализированы процессы тушения модельного очага пожара (МОП) класса А тонкораспыленной струей в соответствии с требованиями, установленными в ГОСТ Р 51057–2001<sup>1</sup> (рис. 1). В качестве основного огнетушащего агента использовалась вода.

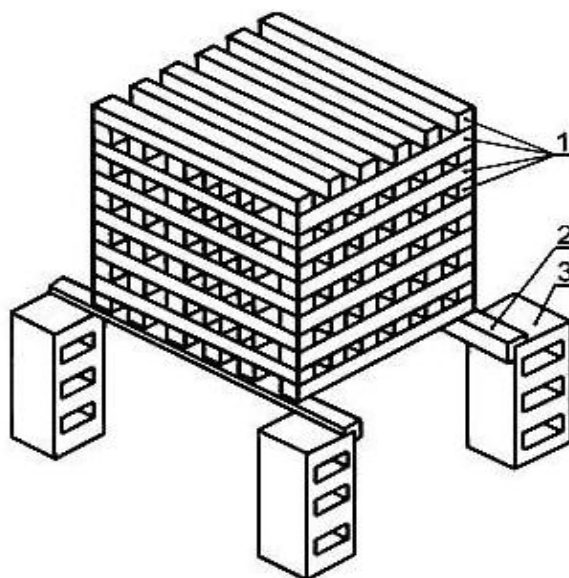


Рис. 1. Устройство деревянного штабеля (МОП класса А)  
для проведения огневых испытаний согласно ГОСТ Р 51057–2001:  
1 – деревянные бруски; 2 – стальные уголки; 3 – бетонный (металлический) блок

<sup>1</sup> ГОСТ Р 51057–2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

Представленная в ранее проводимых авторами исследованиях [2] математическая обработка экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний МУУПТ, позволила разработать модель функционирования установки в реальных условиях пожаротушения и определить ее ключевые газогидродинамические характеристики при использовании различных типов огнетушащих веществ.

Методология исследования базируется на принципах системного анализа и математического моделирования процессов пожаротушения, что обеспечивает достоверность полученных результатов и их практическую применимость при проектировании и эксплуатации установок пожаротушения.

### Метод исследования

В процессе исследования был использован специализированный программный инструментальный FireCat PyroSim, обеспечивающий эффективную интерактивную работу с симуляционной моделью Fire Dynamics Simulator (FDS, в переводе «Симулятор динамики пожара»). Данный программный комплекс, функционирующий посредством графического интерфейса пользователя<sup>2, 3, 4</sup>, позволяет осуществлять детальное моделирование динамики развития пожара.

Следует отметить, что FireCat является официально признанным программным обеспечением в сфере противопожарной защиты, что подтверждается его включением в государственный Фонд алгоритмов и программ МЧС России, специализирующийся на обеспечении пожарной безопасности.

Выбор данного программного комплекса обусловлен его высокой точностью при проведении вычислительных экспериментов и возможностью визуализации результатов моделирования, что существенно повышает достоверность получаемых данных и удобство их интерпретации.

В данной работе рассматривается численная модель FDS, представляющая собой комплексную систему дифференциальных уравнений в частных производных.

Ядро модели составляют фундаментальные уравнения сохранения, включающие компоненты массы (1), импульса (2) и энергии (6), которые решаются посредством численного анализа на трехмерной структурированной расчетной сетке.

Расчет теплообмена осуществляется с применением метода конечных объемов в рамках той же вычислительной сетки.

Математический аппарат модели FDS базируется на решении системы уравнений в частных производных, которая описывает мультифизические процессы:

- температурное поле в пространственно-временной области;
- векторные поля скоростей газодинамических потоков;
- концентрационные поля газовых компонентов (включая кислород и продукты горения);
- поля давления и плотности газовой среды<sup>5, 6</sup>.

---

<sup>2</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. U.S.: National Institute of Standards and Technologies

<sup>3</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition. U.S.: National Institute of Standards and Technologies

<sup>4</sup> Руководство пользователя PyroSim 2022.2. URL: [https://pyrosim.ru/download/Pyrosim\\_manual.pdf](https://pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf) (дата обращения: 21.02.2025)

<sup>5</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. U.S.: National Institute of Standards and Technologies

<sup>6</sup> Руководство пользователя PyroSim 2022.2. URL: [https://pyrosim.ru/download/Pyrosim\\_manual.pdf](https://pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf) (дата обращения: 21.02.2025)

Данная математическая формулировка позволяет осуществлять детальное моделирование термогазодинамических процессов.

Закон сохранения массы описывается уравнением:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

Закон сохранения момента импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot t_{ij}, \quad (2)$$

где тензор вязких напряжений:

$$t_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot u) \right); \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}; \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (5)$$

$$i, j = 1, 2, 3.$$

Закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon, \quad (6)$$

где теплоперенос рассчитывается по формуле:

$$\dot{q}'' = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{q}_r'',$$

а энергия рассеяния:

$$\varepsilon \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla u = \mu \left( 2S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right),$$

где  $p$  – плотность;  $u = [u; v; w]^T$  – три компонента скорости частиц, используемых в качестве огнетушащего агента;  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ ;  $\dot{m}_b'''$  – скорость образования испаряющихся частиц вещества, используемого в качестве ОТВ (капель);  $g$  – ускорение свободного падения;  $f_b$  – параметр учитывающий внешние силы, действующие на частицы ОТВ (капли); переменные (3–5) и  $h_s = \sum_{\alpha} Y_{\alpha} h_{s,\alpha}$  – энергия, доступная для преобразования в тепловую при определенной температуре и давлении (энтальпия):

$$h_{s,\alpha}(T) = \int_{T_0}^T c_{p,\alpha}(T') dT',$$

где  $\dot{q}'''$  – скорость тепловыделения в единичном объеме химической реакции;  $\dot{q}_b'''$  – энергия, передаваемая от испаряющихся частиц вещества, используемого в качестве ОТВ (капель) [3].

В рассматриваемом выше уравнении выделено шесть независимых переменных параметров:

- векторная величина скорости потока (три пространственные компоненты);
- скалярная характеристика плотности среды;
- температурное поле;
- поле давления.

При этом фундаментальный закон сохранения для отдельных компонентов может быть представлен в следующей математической формулировке:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\alpha}) + \nabla \cdot \rho Y_{\alpha} u = \nabla \cdot \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{m}_{\alpha}'''.$$

### Оценка эффективности тушения МУУПТ

В рамках численного моделирования процесса пожаротушения с применением водных огнетушащих агентов была осуществлена верификация на основе экспериментальных данных испытаний МУУПТ с использованием воды, а также результатов комплексного анализа огнетушащей способности водных огнетушителей [4–6].

Однако следует отметить существенный ограничивающий фактор: ввиду неспособности водных огнетушащих составов формировать мелкодисперсную аэрозольную среду, обеспечивающую эффективное ингибирование окислительных процессов, наблюдается недостаточная огнетушащая эффективность при ликвидации МОП соответствующего класса [7].

В программном комплексе PyroSim была создана верифицированная модель МОП класса 0,7 А, имитирующая пожарную нагрузку в виде деревянного штабеля специфической конфигурации: структура включает девять горизонтальных рядов, каждый из которых содержит шесть деревянных брусков с габаритными размерами 500×40×40 мм (рис. 1) [2].

Разработанная симуляционная модель для оценки эффективности пожаротушения с применением МУУПТ при ликвидации горения МОП класса А (рис. 2) точно воспроизводит физические принципы функционирования прототипа установки, что способствует корректной аппроксимации физических процессов пожаротушения средствами численного моделирования.

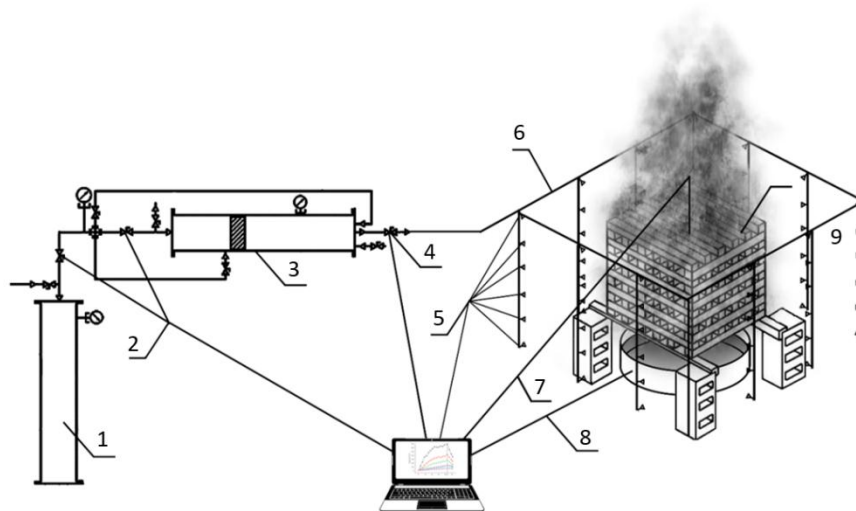


Рис. 2. Симуляционная модель тушения МОП в программе FDS:

- 1 – система изменения давления, подаваемого в систему вытеснения ОТВ;
- 2 – система включения/выключения подачи газа на вытеснение ОТВ;
- 3 – система регулировки объема вытесняемого ОТВ;
- 4 – система включения/выключения подачи ОТВ; 5 – сопла подачи ОТВ на тушение;
- 6 – контур расположения системы сопел; 7 – вертикаль расположения термопар;
- 8 – источник горения; 9 – деревянный штабель

В рамках компьютерного моделирования все компоненты МУУПТ были имплементированы в программный комплекс FDS с сохранением функциональных характеристик и параметров управления в соответствии с ГОСТ Р 51057–2001. Алгоритмическое обеспечение установки базируется на принципах, детально описанных в предшествующих исследованиях [1, 2, 8].

Экспериментальная модель построена в открытом пространстве. Модельное возгорание ранга 0,7 А МОП класса А параметрически реализовано с использованием деревянного штабеля, конфигурация которого соответствует нормативным требованиям (как представлено на рис. В.1, табл. В.1 и п. 5.21 ГОСТ Р 51057–2001). В качестве горючего материала использована древесина, соответствующая требованиям ГОСТ 8486–86<sup>7</sup>, с заданными параметрами: поперечное сечение 0,04 м, протяженность 0,5 м, уровень влажности древесины 15 % (в пределах допустимых значений по ГОСТ 16588–91<sup>8</sup> – 10–20 %).

Для имитации возгорания горючей жидкости использован модельный поддон с геометрическими параметрами 400×400×100 мм (длина×ширина×высота), соответствующий рангу 0,7А МОП. Параметры источника горения заданы с учетом объемной концентрации бензино-водной смеси согласно данным табл. В.2 ГОСТ Р 51057–2001.

Температурный мониторинг осуществлялся с помощью термопар, расположенных вдоль центральной оси штабеля: в надповерхностном пространстве, внутри конструкции и в нижней части с равномерным шагом 0,13 м. Базовая термопара размещена на удалении 0,28 м от источника возгорания, последующие – на расстоянии 0,41 м, 0,59 м, 0,77 м и 0,90 м соответственно. На рис. 3 представлено вертикальное расположение измерительных датчиков в последовательности T<sub>28</sub>, T<sub>41</sub>, T<sub>59</sub>, T<sub>77</sub>, T<sub>90</sub>.

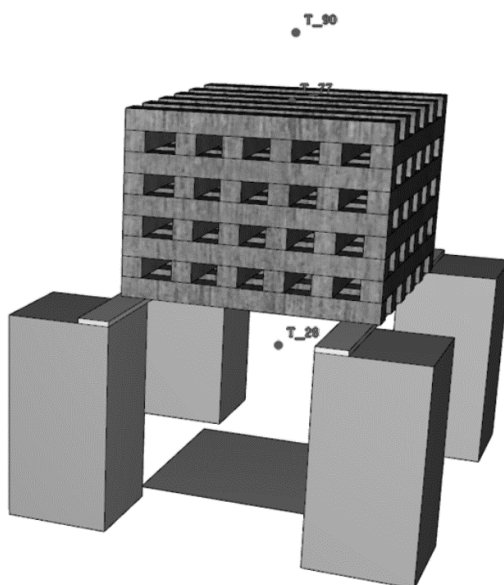


Рис. 3. Расположение термопар T<sub>28</sub>, T<sub>41</sub>, T<sub>59</sub>, T<sub>77</sub>, T<sub>90</sub>

В ходе компьютерного моделирования была осуществлена имитация динамики перемещения пожарного в процессе ликвидации горения МОП и перемещение раструба МУУПТ с вытесняемым ОТВ относительно плоскости тушения.

Для реализации данной модели была применена конфигурация с перпендикулярным расположением сопел относительно поверхности штабеля на фиксированном расстоянии в 0,3 м. Пространственная организация системы сопел характеризовалась равномерным распределением с шагом 0,01 м как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости с дополнительным размещением напротив сквозных отверстий штабеля. Такая конфигурация обеспечивала направленное распределение огнетушащего вещества как в объеме штабеля, так и по диагональным направлениям к его центру. Система включала 148 сопел (рис. 4),

<sup>7</sup> ГОСТ 8486–86. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

<sup>8</sup> ГОСТ 16588–91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. Доступ из информ.-правового портала «Гарант»

распределенных следующим образом: по 30 ед. на каждой плоскости тушения и по 7 сопел на каждом из четырех боковых ребер штабеля. Временная активация каждого сопла была синхронизирована с учетом максимально допустимого времени вытеснения ОТВ из огнетушителя согласно нормативным требованиям ГОСТ Р 51057–2001.

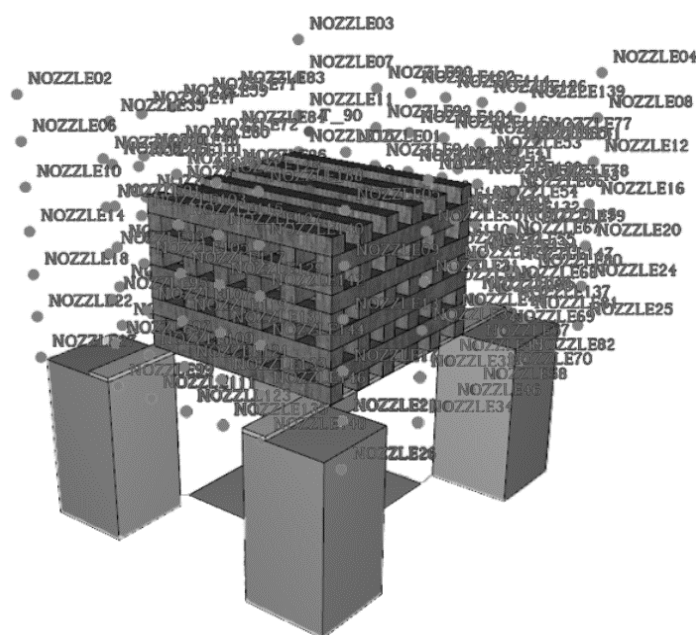


Рис. 4. Расположение сопел в симуляционной модели

Алгоритм функционирования системы предусматривал последовательную активацию сопел: инициализация первого сопла осуществлялась на 540 с моделирования, последующая деактивация каждого сопла производилась в момент активации следующего с интервалом 0,05 с. Общая продолжительность процесса тушения МОП составила 8 с, что соответствует нормативному времени полного вытеснения ОТВ из огнетушителя согласно установленным требованиям ГОСТ Р 51057–2001.

В процессе исследования была осуществлена адаптация методики испытаний согласно нормативным требованиям п. В.2.3 ГОСТ Р 51057–2001 посредством программного комплекса PyroSim, обладающего расширенными функциональными возможностями для калибровки параметров моделирования и оперативного управления элементами симуляции.

Алгоритм моделирования включал следующие этапы:

1. Инициализация процесса:

- активация горения горючей жидкости, размещенной под структурой деревянного штабеля, в момент начала моделирования;
- автоматическое прекращение горения жидкости через 120 с, имитирующее извлечение поддона;
- продолжение разгорания древесного штабеля в течение дополнительных 420 с после прекращения горения жидкости.

2. Фаза тушения:

- инициирование процесса тушения спустя 540 с от начала моделирования;
- последовательная активация сопел для подачи ОТВ на тушение МОП с имитацией векторного движения сверху вниз и имитацией динамики перемещения пожарного вокруг штабеля;
- завершение процесса тушения МОП при достижении температурных показателей, соответствующих окружающей среде, на поверхности внутреннего элемента штабеля.

## 3. Завершающий этап:

– десятиминутная фаза посттушения для фиксации температурных колебаний и отсутствия самовозгорания;

– регистрация ключевых показателей: расход огнетушащего вещества, продолжительность тушения, температурные характеристики в различных зонах МОП.

Для обеспечения вычислительной эффективности параллельных расчетов в программном комплексе FDS была определена оптимальная конфигурация расчетной сетки согласно методическим рекомендациям<sup>9,10,11</sup>. Проведенный анализ чувствительности сетки позволил определить критерий точности дискретизации для моделирования восходящих потоков пламени на основе безразмерного выражения:

$$\frac{D^*}{\delta x}, \quad (7)$$

где  $D^*$  – характеристический диаметр огня (м):

$$D^* = \left( \frac{Q}{p_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (8)$$

где  $\delta x$  – номинальный размер ячейки сетки (м);  $Q$  – скорость тепловыделения (кВт);  $p$  – плотность окружающего воздуха (кг/м<sup>3</sup>);  $c$  – удельная теплоемкость воздуха (кДж/кг/К);  $T$  – температура окружающей среды (С°);  $g$  – сила тяжести (кг/с<sup>2</sup>).

Величина  $\frac{D^*}{\delta x}$  может быть расценена как число вычислительных ячеек, охватывающих характеристический (необязательно физический) диаметр огня<sup>12</sup>.

Была осуществлена дискретизация моделируемого пространства посредством разбиения на 16 расчетных сеток с варьируемыми параметрами, представленными в таблице. Определение характеристик расчетной структуры осуществлялось на основе критериального подхода с учетом отношения характеристического диаметра к размеру ячейки сетки в диапазоне от 4 до 16 согласно представленным в работе формулам (7), (8) и рис. 5.

Введите исходные данные:	
Скорость тепловыделения Q, кВт	2000
Плотность окружающего воздуха, кг/м3	1,204
Удельная теплоемкость воздуха, кДж/кг/К	1,005
Температура окружающей среды, С	20
Сила тяжести, м/с2	9,81
D*	1,26536

Рассчитать размер ячейки сетки dx для соотношения D*/dx:		
D*/dx	dx	
4	0,32	м
10	0,13	м
16	0,08	м

Рассчитать соотношение D*/dx для заданного размера dx:	
dx	D*/dx
0,25	5,1

Рис. 5. Окно вычисления расчетной сетки FDS

<sup>9</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-1. Sixth Edition. U.S.: National Institute of Standards and Technologies

<sup>10</sup> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. NIST Special Publication 1018-3. Sixth Edition. U.S.: National Institute of Standards and Technologies

<sup>11</sup> Руководство пользователя PyroSim 2022.2. URL: [https://pyrosim.ru/download/Pyrosim\\_manual.pdf](https://pyrosim.ru/download/Pyrosim_manual.pdf) (дата обращения: 21.02.2025)

<sup>12</sup> Там же.

Таблица

Характеристики расчетных сеток в FDS

Номер сетки	Название сетки	Геометрические размеры, {X}x{Y}x{Z}, м	Размеры ячеек, {X}x{Y}x{Z}, м	Количество ячеек в сетке
1	MESH-a	0,24x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	87 552
2	MESH-b	0,24x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	87 552
3	MESH-c	0,24x0,2x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
4	MESH-d	0,24x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	87 552
5	MESH-e	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
6	MESH-f	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
7	MESH-g	0,2x0,2x1,52	0,01x0,01x0,01	60 800
8	MESH-h	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
9	MESH-i	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
10	MESH-j	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
11	MESH-k	0,2x0,2x1,52	0,01x0,01x0,01	60 800
12	MESH-l	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
13	MESH-m	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
14	MESH-n	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960
15	MESH-o	0,2x0,2x1,52	0,01x0,01x0,01	60 800
16	MESH-p	0,2x0,24x1,52	0,01x0,01x0,01	72 960

Полный расчетный объем составляет  $1,17 \text{ м}^3$ , общее количество ячеек в модели – 1 174 656.

Продолжительность компьютерного моделирования составила 1 200 с (20 мин), что соответствует требованиям нормативной документации по испытанию огнетушителей при ликвидации горения МОП. Анализ мощности тепловыделения в процессе моделирования (рис. 6) позволил выявить следующие ключевые временные интервалы:

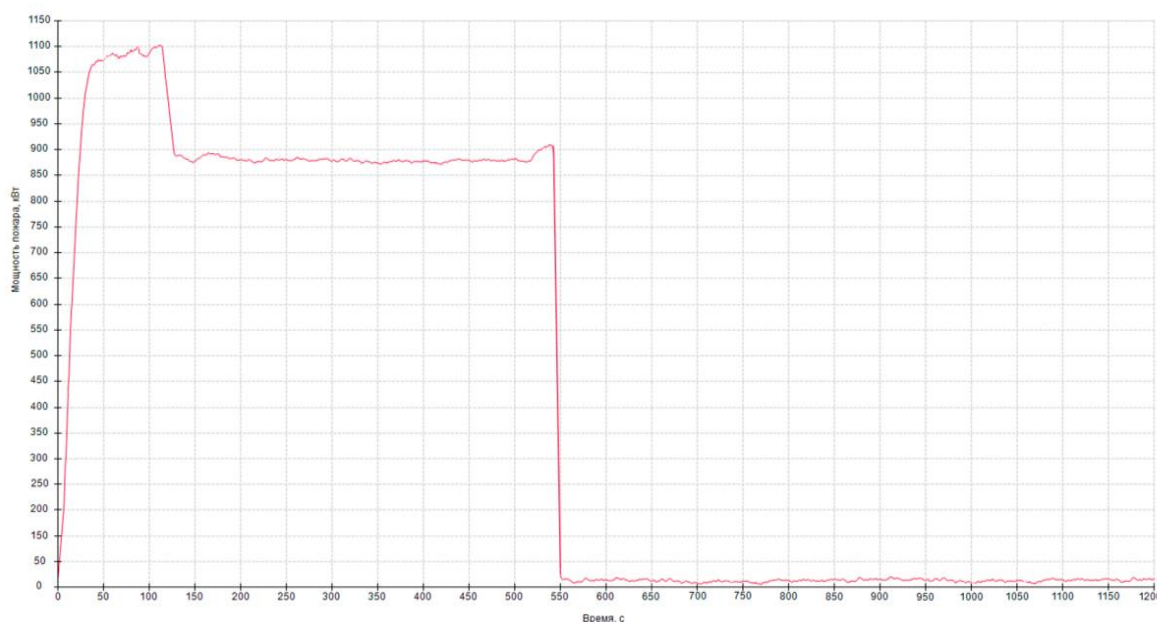


Рис. 6. График мощности горения деревянного штабеля

1. Начальная фаза (0–120 с):

– активное участие в процессе горения поддона с легковоспламеняющейся жидкостью;

– мощность тепловыделения составляет 1 100 кВт.

2. Переходный этап (120 с):

– имитация извлечения поддона;

– резкое снижение мощности горения до  $\sim 875$  кВт.

3. Фаза активного горения (120–540 с):

– устойчивое горение деревянного штабеля.

4. Этап пожаротушения (540 с и более):

– инициирование процесса тушения;

– снижение мощности горения до  $\sim 10$  кВт к 550 с;

– стабилизация процесса, соответствующая остаточному тепловыделению древесины и испарению огнетушащего вещества.

Графическая визуализация нормализованных значений относительной фазовой проницаемости (ОФП) по воде представлена на рис. 7–11.

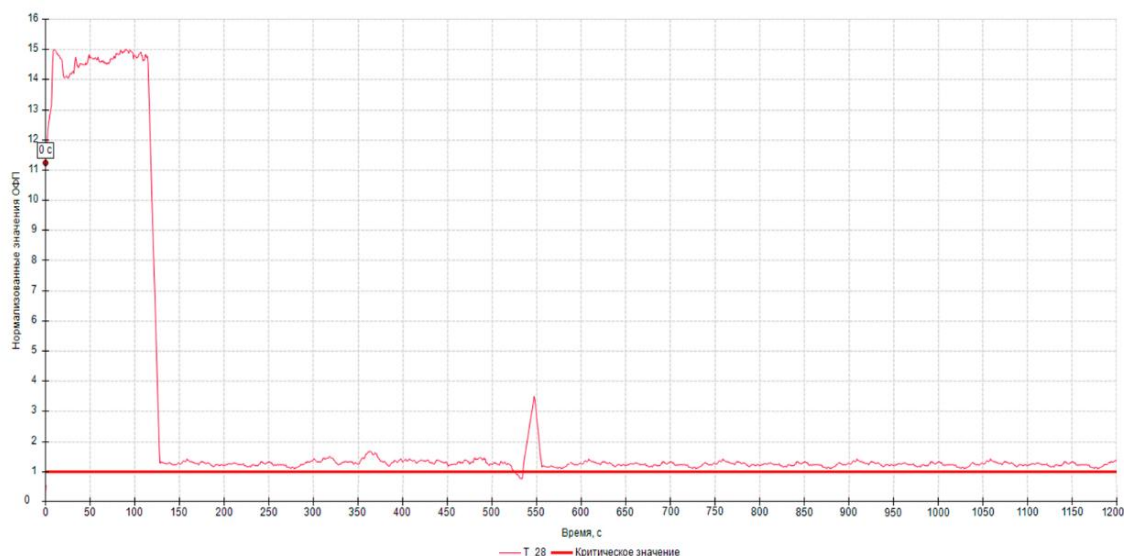


Рис. 7. График нормализованных значений относительной фазовой проницаемости по воде для термопары T\_28

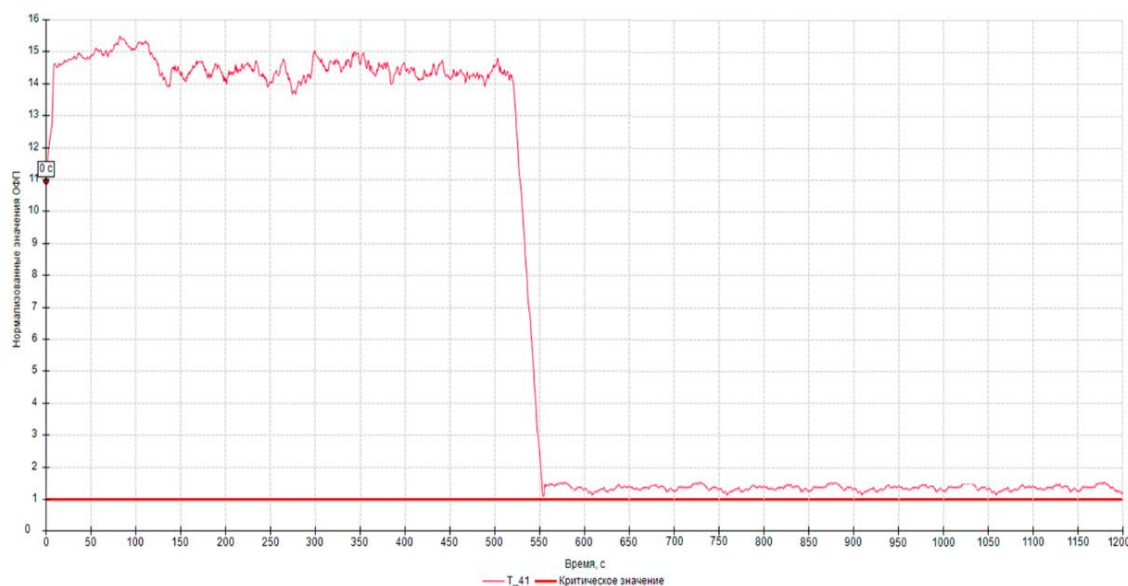


Рис. 8. График нормализованных значений относительной фазовой проницаемости по воде для термопары T\_41

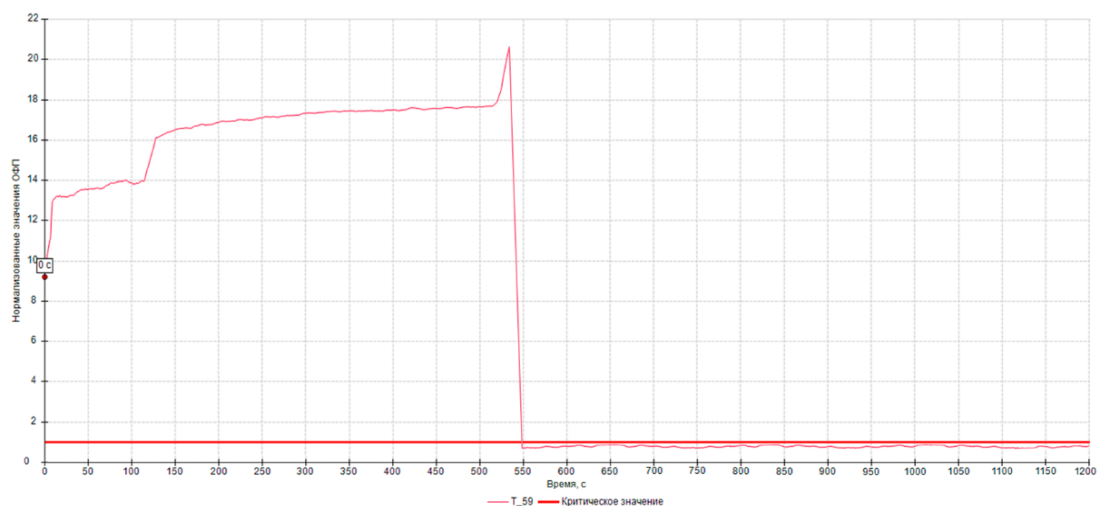


Рис. 9. График нормализованных значений  
относительной фазовой проницаемости по воде для термопары T\_54

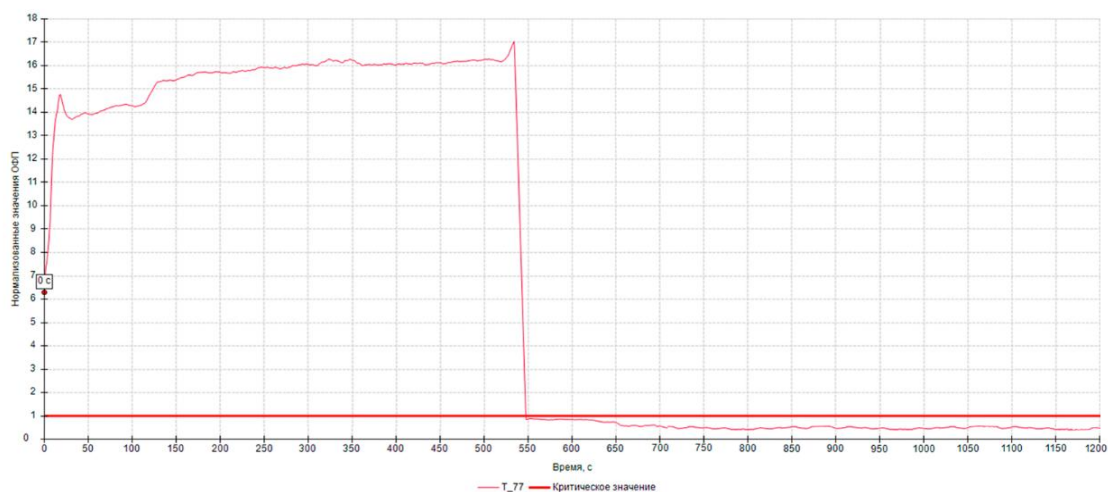


Рис. 10. График нормализованных значений  
относительной фазовой проницаемости по воде для термопары T\_77

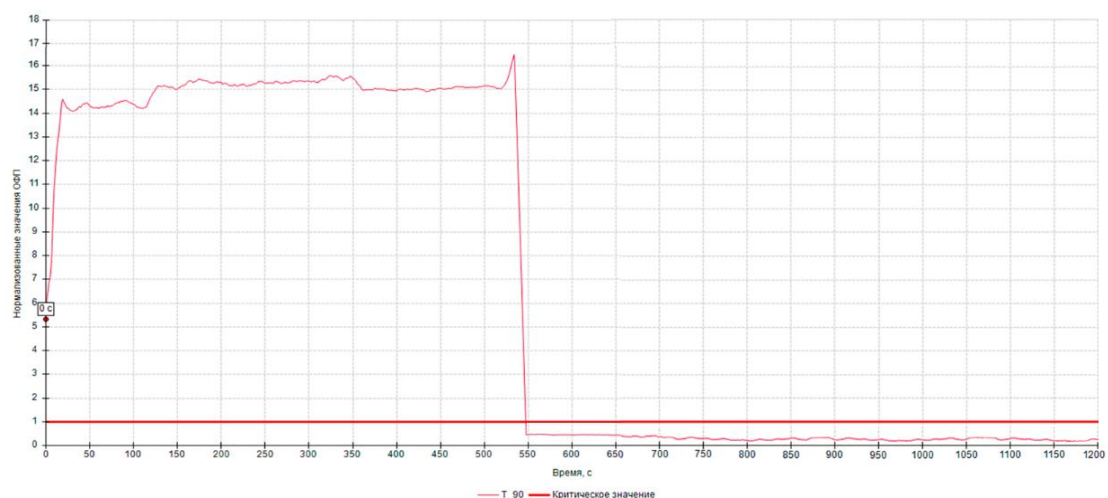


Рис. 11. График нормализованных значений  
относительной фазовой проницаемости по воде для термопары T\_90

На рис. 12 представлены графики изменения температуры в горизонтальном разрезе на высоте 54 см в разные моменты времени моделирования, где:

- рис. 12 А отражает температуру в начале моделирования;
- рис. 12 Б – температуру в момент отключения источника загорания из процесса моделирования;
- рис. 12 В – температуру за 1 сек. до начала процесса тушения МОП;
- рис. 12 Г – температуру через 1 сек. после начала тушения;
- рис. 12 Д – температуру через 5 сек. после начала тушения;
- рис. 12 Е – температуру в момент окончания тушения МОП;
- рис. 12 Ж – температуру в конечный момент времени моделирования (1 200 сек.).

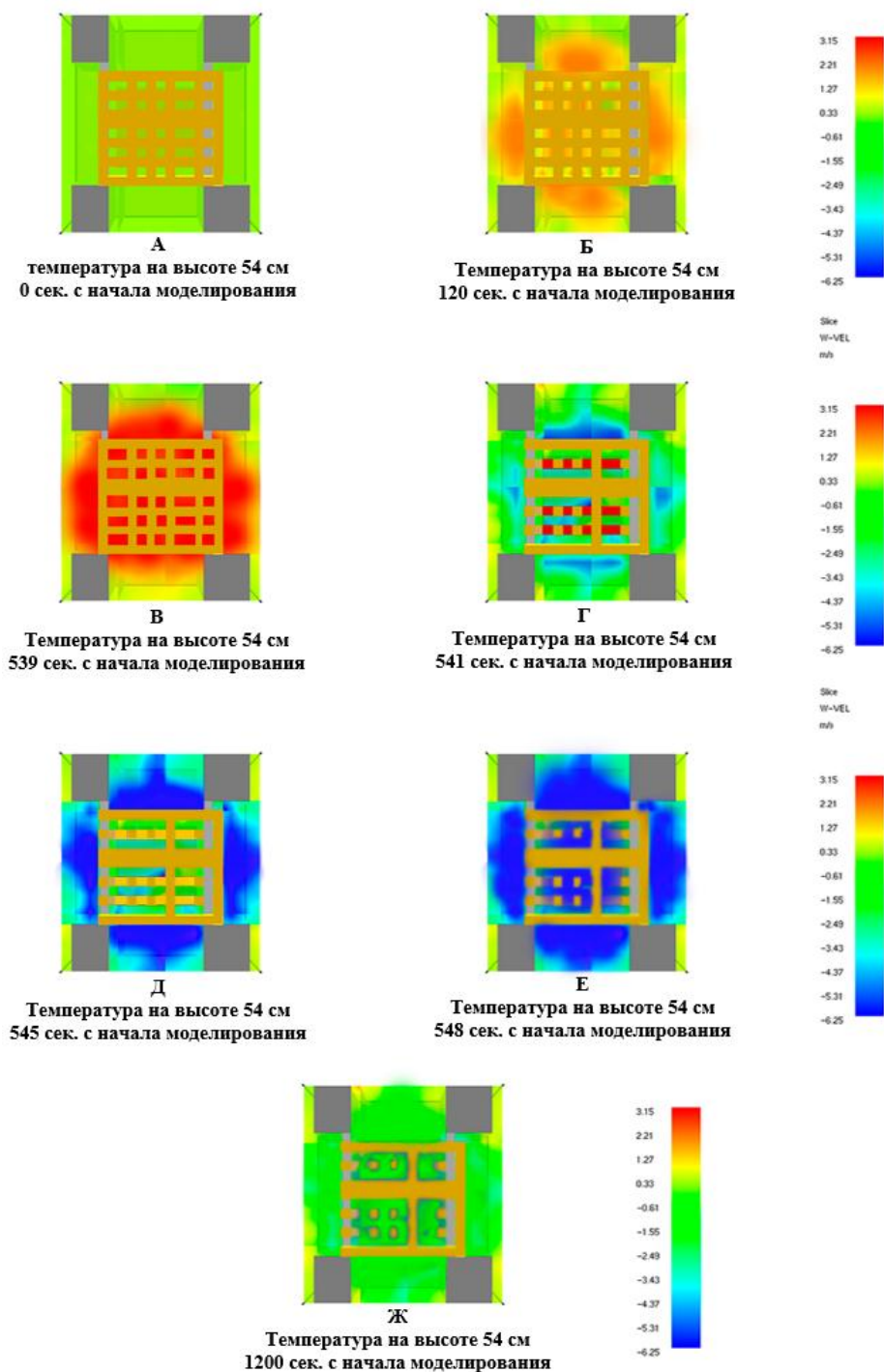


Рис. 12. Изменение температуры в горизонтальном сечении на высоте 54 см

## Выводы

Результаты проведенного моделирования демонстрируют превосходство предложенной конструкции МУУПТ над традиционным водным огнетушителем при ликвидации МОП класса А. Данный эффект обусловлен следующими конструктивными особенностями:

1. Повышенное давление подачи ОТВ.
2. Стабильность внутреннего давления в течение всего процесса пожаротушения.
3. Равномерное распределение ОТВ на протяжении всего периода тушения МОП.

Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения разработанной конструкции МУУПТ для эффективного пожаротушения в условиях МОП класса А.

## Список источников

1. Шилов А.Г. Требования к макету экспериментальной универсальной установки пожаротушения с вытеснением огнетушащего вещества газопоршневым способом // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 1 (61). С. 171–180. EDN BTNTRN.
2. Сытдыков М.Р., Шилов А.Г., Копкин Е.В. Определение гидродинамических характеристик экспериментальной универсальной установки для тушения пожаров на транспорте // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 4 (56). С. 145–152. EDN TBSSYT.
3. Малышев К.С. Математическое моделирование типовых очагов горения в начальной стадии при помощи программы FDS (Fire Dynamics Simulator) // Молодой ученый. 2011. № 10 (33). Т. 1. С. 54–57.
4. Сытдыков М.Р., Шилов А.Г., Бруснянин Д.В. Огневые испытания мобильной универсальной установки пожаротушения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 175–184. EDN RZTMRL.
5. Шилов А.Г. Методика тушения пожаров мобильной установкой пожаротушения с вытеснением огнетушащего вещества газопоршневым способом: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2024. 202 с. EDN GXWNOU.
6. Абдурагимов И.М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 60–82.
7. Мешалкин Е.А., Шевченко П.М. Состояние и перспективы разработок изделий для тушения пожаров тонкораспыленной водой // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 1. С. 68–75. EDN KNTZVV.
8. Шилов А.Г., Сытдыков М.Р. Методика тушения пожаров на транспорте универсальной установкой пожаротушения с вытеснением огнетушащего вещества газопоршневым способом // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2021. № 4. С. 44–50.

## References

1. Shilov A.G. Trebovaniya k maketu eksperimental'noj universal'noj ustanovki pozharotusheniya s vytesneniem ognetushashchego veshchestva gazoporshnevym sposobom // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 1 (61). S. 171–180. EDN BTNTRN.
2. Sytdykov M.R., Shilov A.G., Kopkin E.V. Opredelenie gidrodinamicheskikh harakteristik eksperimental'noj universal'noj ustanovki dlya tusheniya pozharov na transporte // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2020. № 4 (56). S. 145–152. EDN TBSSYT.
3. Malyshev K.S. Matematicheskoe modelirovanie tipovyh ochagov goreniya v nachal'noj stadii pri pomoshchi programmy FDS (Fire Dynamics Simulator) // Molodoj uchenyj. 2011. № 10 (33). T. 1. S. 54–57.
5. Sytdykov M.R., Shilov A.G., Brusyanin D.V. Ognevye ispytaniya mobil'noj universal'noj ustanovki pozharotusheniya // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 4 (68). S. 175–184. EDN RZTMRL.

6. Shilov A.G. Metodika tusheniya pozharov mobil'noj ustanovkoj pozharotusheniya s vytesneniem ognetyashchego veshchestva gazoporshnevym sposobom: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2024. 202 s. EDN GXWNOU.

7. Abduragimov I.M. O mekhanizme ognetyashchego dejstviya sredstv pozharotusheniya // Pozharovzryvobezopasnost'. 2012. T. 21. № 4. S. 60–82.

8. Meshalkin E.A., Shevchenko P.M. Sostoyanie i perspektivy razrabotok izdelij dlya tusheniya pozharov tonkoraspylennoj vodoj // Pozharovzryvobezopasnost'. 2008. T. 17. № 1. S. 68–75. EDN KNTZVV.

9. Shilov A.G., Sytdykov M.R. Metodika tusheniya pozharov na transporte universal'noj ustanovkoj pozharotusheniya s vytesneniem ognetyashchego veshchestva gazoporshnevym sposobom // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2021. № 4. S. 44–50.

#### **Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 06.03.2025; одобрена после рецензирования: 02.04.2025; принята к публикации: 23.05.2025

#### **The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 06.03.2025; approved after review: 02.04.2025; accepted for publication: 23.05.2025

#### *Информация об авторах:*

**Сытдыков Максим Равильевич**, начальник кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: sytdykov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5343-4764>, SPIN-код: 7548-0539

**Шилов Александр Геннадьевич**, начальник отделения информатизации учебного процесса отдела технологий открытого образования института заочного и дистанционного обучения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр. 149), кандидат технических наук, e-mail: shilov@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9771-8665>, SPIN-код: 9775-0258

**Лебедев Андрей Юрьевич**, заместитель начальника института заочного и дистанционного обучения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр. 149), e-mail: lebedev@igps.ru, кандидат технических наук, доцент, SPIN-код: 2621-6733

#### *Information about the authors:*

**Sytdykov Maxim R.**, head of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: sytdykov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5343-4764>, SPIN: 7548-0539

**Shilov Alexander G.**, head of the department of informatization of the educational process of department of open education technologies, institute of correspondence and distance learning of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: shilov@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9771-8665>, SPIN: 9775-0258

**Lebedev Andrey Yu.**, deputy head of the institute of correspondence and distance learning of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: lebedev@igps.ru, candidate of technical sciences, associate professor, SPIN: 2621-6733