

Научная статья
УДК 654.924.56
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.83.31.023

Оценка времени срабатывания систем пожарной сигнализации при различных режимах газообмена

Максим Андреевич Гудков¹
Артем Александрович Гапеев¹
Сергей Анатольевич Гречаный²
Дмитрий Юрьевич Калков²
Юлия Николаевна Коваль³

¹Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

²Воронежский институт МВД России, Воронеж, Россия

³Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Артем Александрович Гапеев, kratos_1987@mail.ru

Аннотация. В работе проведены эксперименты по сравнению традиционной проводной системы и видеоаналитики в режимах «регулируемая вентиляция» (ПРВ) и «регулируемая нагрузка» (ПРН). Установлено, что при ПРВ проводная система срабатывает быстрее, а при ПРН – видеодетектор превосходит по скорости реакции. Для каждого режима газообмена определена концентрация угарного газа, а также установлено, что время срабатывания происходит до достижения смертельно опасных концентраций угарного газа, а также концентраций, способных вызвать необратимые последствия в организме. Дано заключение о взаимодополняющем использовании пожарной сигнализации и извещателя пожарного с видеоканалом для повышения надежности и оперативности обнаружения пожара, а также рекомендации по калибровке пороговых значений и фильтрации ложных тревог. Особое внимание уделено практическим аспектам интеграции видеодетекторов в существующие системы пожарной безопасности, особенно в объектах с высокой тепловой нагрузкой и риском быстрого развития пожара. Предложены подходы к адаптации порогов срабатывания ИПВ в условиях слабого задымления и недостаточной освещенности для минимизации задержек обнаружения. Эксперименты подтверждают целесообразность комбинированного применения обоих методов для обеспечения максимальной защиты на ранних стадиях возгорания.

Ключевые слова: устаревшие спортивные объекты, распространение продуктов горения, пожарная безопасность, моделирование динамики пожара, противопожарная защита

Для цитирования: Гудков М.А., Гапеев А.А., Гречаный С.А., Калков Д.Ю., Коваль Ю.Н. Оценка времени срабатывания системы пожарной сигнализации при различных режимах газообмена // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 270-278. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.83.31.023>.

Original article.

Estimation of the response time of fire alarm systems in various modes of gas exchange

*Maxim A. Gudkov*¹

*Artem A. Gapeev*¹

*Sergey A. Grechany*²

*Dmitry Y. Kalkov*²

*Yulia N. Koval*³

¹Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia

²Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Voronezh, Russia

³Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: Artem A. Gapeev, kratos_1987@mail.ru

Abstract. Experiments have been conducted comparing the traditional wired system and video analytics in the "ventilation-controlled" and "load-controlled" modes. It has been established that the wired system works faster with PRV, and with PRN, the video detector is faster in reaction speed. For each mode of gas exchange, the concentration of carbon monoxide is determined, and it is also established that the response time occurs before reaching deadly concentrations of carbon monoxide, as well as concentrations that can cause irreversible effects in the body. The conclusion is given on the complementary use of a fire alarm and a fire detector with a video channel to increase the reliability and efficiency of fire detection, as well as recommendations for calibrating thresholds and filtering false alarms. Special attention is paid to the practical aspects of integrating video detectors into existing fire safety systems, especially in facilities with high thermal stress and the risk of rapid fire development. Approaches to adaptation of IPV trigger thresholds are proposed in conditions of low smoke and insufficient illumination to minimize detection delays. Experiments confirm the expediency of combining both methods to ensure maximum protection in the early stages of a fire.

Keywords: load-controlled fire, ventilation-controlled fire, gas exchange, fire alarm, video analysis, carbon monoxide

For citation: Gudkov M.A., Gapeev A.A., Grechany S.A., Kalkov D.Y., Koval Yu.N. Estimation of the response time of fire alarm systems in various modes of gas exchange // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 270-278. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.83.31.023>.

Введение

Современные системы пожарной сигнализации представлены тремя основными типами: проводными, беспроводными и аспирационными системами. Каждый тип имеет свои уникальные характеристики, преимущества и области применения.

Проводные системы пожарной сигнализации. Проводные системы пожарной сигнализации основаны на передаче данных по физическим кабельным линиям между извещателями и приемно-контрольными приборами. Эти системы используют напряжение 12-24 В и включают датчики различных типов: тепловые, дымовые, газовые и извещатели пламени.

Основные типы подключения включают:

- питание по шлейфу сигнализации;
- питание по самостоятельному кабелю;
- питание от автономного источника.

Беспроводные системы пожарной сигнализации. Данные системы используют радиоканалы для передачи сигналов между извещателями и контрольной панелью. Датчики работают от автономных источников питания и передают данные на частотах 433-434 МГц или 868 МГц. Радиус действия составляет от 300 до 1200 метров на открытой местности, что позволяет эффективно покрывать большие территории.

Аспирационные системы пожарной сигнализации. Принцип работы таких систем основан на активном отборе воздуха через сеть трубопроводов с отверстиями, расположенными в защищаемых зонах. Встроенный вентилятор создает постоянный поток воздуха, который анализируется высокочувствительными оптическими датчиками в центральном блоке. Современные аспирационные извещатели используют мультифакторный анализ, контролируя оптическую плотность, концентрацию угарного газа и изменения температуры одновременно [1]. Сравнительную таблицу по преимуществам и недостаткам систем можно представить в виде (Табл.1):

Табл.1. Сравнительная характеристика систем пожарной сигнализации

Характеристика	Проводные системы	Беспроводные системы	Аспирационные системы
Время срабатывания	10-30 секунд	10-30 секунд	1-10 секунд
Порог обнаружения (дым)	0,05-0,2 дБ/м	0,05-0,2 дБ/м	0,001-0,05 дБ/м
Порог обнаружения (температура)	54-78°C ±5°C	54-78°C ±5°C	Не применимо
Радиус действия/Покрытие	До 9 м между осями ИП	300-1200 м на открытой местности	До 2000 м ² одним блоком
Время установки/монтажа	Высокое (штробление)	Низкое (без проводки)	Среднее
Стоимость оборудования	Низкая	Высокая	Очень высокая
Стоимость монтажа	Высокая	Низкая	Средняя
Надежность связи	Очень высокая	Высокая	Очень высокая
Помехоустойчивость	Высокая	Средняя	Высокая
Время работы от батарей	Не требуется	3-10 лет	Не требуется
Требования к обслуживанию	Низкие	Средние	Высокие
Возможность расширения	Сложная	Простая	Ограниченная
Защита от повреждений	Высокая	Средняя	Очень высокая
Ложные срабатывания	Низкие	Возможны от помех	Очень низкие
Совместимость	Высокая	Средняя	Низкая

Однако введение ГОСТ 34698-2020 «Извещатели пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний» [2] в 2023 году стало переломным моментом в развитии систем пожарной сигнализации в России. Особое значение имело официальное закрепление понятия «извещатель пожарный с видеоканалом обнаружения» (ИПВ), что открыло дорогу для массового внедрения технологий машинного зрения в противопожарную защиту.

ГОСТ 34698-2020 определяет ИПВ как «автоматический пожарный извещатель, выполняющий функцию обнаружения возгорания посредством анализа видеонаблюдения в контролируемом поле зрения». Это определение впервые на законодательном уровне узаконило применение видеоаналитики для пожарного мониторинга [3].

Стандарт установил четкие технические требования к ИПВ, включая обязательное наличие источника подсветки для работы в условиях низкого уровня освещенности. Это решение значительно расширило область применения таких систем, особенно в условиях ограниченной видимости. Кроме того, СП 484.1311500.2020 определил, что ИП с видеоканалом обнаружения следует применять, если в зоне контроля предполагается появление открытого пламени и/или дыма на начальной стадии пожара. Основная область применения аналогична дымовым извещателям и извещателям пламени [4].

Использование ИПВ позволяет решить задачи, с которыми указанные ранее системы были неэффективны:

- мониторинг тоннелей и метро;
- промышленные объекты с технологическими процессами;
- лесные массивы и природоохранные зоны;
- складские комплексы и логистические центры;
- транспортные узлы и терминалы.

Согласно открытым статистическим данным, 70-80% гибели людей происходит от продуктов горения, в частности угарного газа (СО) [5-7].

На основании представленного, практический интерес представляет сопоставление времени идентификации признаков возгорания классической системой пожарной сигнализации и системой идентификации на основе видеоанализа (детекция дыма и огня) с концентрацией угарного газа для различных режимов газообмена на внутреннем пожаре.

Эксперимент и его описание

При проведении экспериментальных исследований сделаем ряд допущений: исключим из анализируемых систем аспирационную систему пожарной сигнализации по причине того, что ее можно сконфигурировать так, чтобы она генерировала сигнал тревоги при достижении в исследуемом воздухе заданного порога концентрации СО без достижения дымового порога, кроме того доля их на объектах не превышает 7-10%, а если рассматривать сегмент массового коммерческого жилья и жилые объекты (офисы, торговые центры, жилые комплексы), то доля их применения снижается до 2–3% [8].

В зависимости от соотношения массовой скорости образования горючих газов и скорости их сгорания внутри помещения различают два режима внутреннего пожара. В тех случаях, когда приток воздуха достаточен для достижения максимальной полноты сгорания, обусловленной видом горючего, массовая скорость выгорания не зависит от расхода воздуха, поступающего в помещение. Такой режим получил название «пожар регулируемый нагрузкой» (ПРН). В тех случаях, когда интенсивность газообмена ограничивает массовую скорость выгорания, т.е. приток воздуха в помещение не обеспечивает максимальную полноту сгорания горючих газов, пожар называется регулируемым вентиляцией (ПРВ) [9]. Численная величина, позволяющая определить режим газообмен (1):

$$\Phi = \frac{\rho_v \sqrt{g} \cdot S_{пр} \sqrt{H_{пр}}}{S_{гор}} \quad (1)$$

где, ρ_v – плотность наружного воздуха, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $S_{пр}$ – площадь проема, м²; $H_{пр}$ – высота проема, м²; $S_{гор}$ – площадь поверхности горения, м².

Если $\Phi < 0,253$ объемный пожар будет развиваться и протекать в режиме ПРВ; если $\Phi > 0,29$ – в режиме ПРН. При промежуточных значениях числа Φ в помещении будет переходный режим. Таким образом, используя параметр проемности помещения можно устанавливать режим газообмена [9].

Проводная система пожарной сигнализации строилась базе приемно-контрольного прибора пожарного малой информационной емкостью «Астра-713» (Рис.1а). Идентификация возгорания проводилась с помощью извещателя пожарного адресно-аналогового оптико-электронного ДИП-34А-03 (Рис.1б).



Рис.1. Внешний вид прибора приемно-контрольного пожарного Астра-713 (а), (б) извещатель пожарный адресно-аналоговый оптико-электронный ДИП-34А-03

В качестве ИПВ использовали камеру Сокол-OZ 4Мр Extreme Vision АйТек ПРО с модулем видеоаналитики «Детектор дыма и огня» (Рис.2). Нейросетевая архитектура камеры основана на анализе цвета, движения и формы объектов с использованием нейросети. Система

использует сверточную нейронную сеть (CNN) для обработки видеопотока и распознавания признаков возгорания.



Рис.2. Внешний вид камеры «Сокол-OZ 4Мр Extreme Vision АйТек ППО» с модулем видеоналитики «Детектор дыма и огня»

Здесь реализован классический подход для «машинного зрения» заключающийся в извлечении и агрегации признаков из изображения и включает в себя следующие основные этапы:

1. Ввод и нормализация. Видеокадр с камеры приводится к фиксированному размеру (например, 256×256 пикселей) и нормируется (приведение значений пикселей к диапазону [0;1] или центрирование вокруг нуля).

2. Сверточные слои. На первом слое сеть применяет набор небольших фильтров (обычно 3×3 или 5×5), которые «сканируют» изображение и выявляют простейшие признаки: границы, угловые переходы, резкие изменения яркости. Каждый фильтр при свертке перемножает свои веса с пикселями за вычетом смещения и формирует так называемую карту признаков (feature map). При последующих сверточных слоях фильтры уже обучены распознавать более сложные структуры: текстуры дыма, характерный контур языков пламени, турбулентные волны.

3. Нелинейная активация. После сверточных операций к каждому значению feature map применяется функция активации ReLU (Rectified Linear Unit): $f(x)=\max(0,x)$. Это позволяет сети моделировать сложные нелинейные зависимости и ускоряет сходимость обучения.

4. Подвыборка (Pooling). Для уменьшения пространственного размера карт признаков используется операция максимум-пулинга (max pooling) или среднее-пулинга (average pooling) с окном 2×2. Это делает сеть более устойчивой к смещениям и небольшим вариациям в положении объектов (дымовых «облачков» или языков пламени).

5. Многоуровневое извлечение признаков. Последовательно чередуя сверточные слои и пулинг, сеть получает иерархию признаков: от простых границ на первых уровнях до сложных объектов (диффузная структура дыма, характерное мерцание огня) на глубоких уровнях.

6. Полносвязные слои и классификация. Итоговые feature maps разворачиваются в единый вектор и передаются в один или несколько полносвязных (Dense) слоев, где происходит агрегация информации по всему кадру. На выходе последнего полносвязного слоя через softmax-функцию или сигмоиду, сеть выдает вероятность наличия пламени и/или дыма.

7. Постобработка и логика тревоги. Полученные вероятностные оценки сравниваются с заранее заданными порогами. Срабатывание подтверждается, если вероятность превышает порог несколько кадров подряд, что снижает число ложных тревог.

8. Обучение сети. Сеть изначально обучена на большом наборе размеченных изображений (изображения, к которым добавлены аннотации, метки или теги) с очагами пожара и сценами без огня/дыма. Используется алгоритм обратного распространения ошибки и стохастический градиентный спуск для корректировки весов фильтров.

Благодаря свёрточным слоям и нелинейным активациям такая архитектура эффективно обнаруживает визуальные признаки возгорания в реальном времени, обеспечивая высокую скорость реакции (несколько десятков миллисекунд на кадр) и низкий уровень ложных срабатываний.

Мониторинг концентрации угарного газа осуществлялся с помощью четырехканального газоанализатора «ТОП-Сенс» (Рис.3).



Рис.3. Внешний вид газоанализатора четырехканального «ТОП-Сенс»

Моделирование условий газообмена осуществлялось в макете помещения (Рис.4)

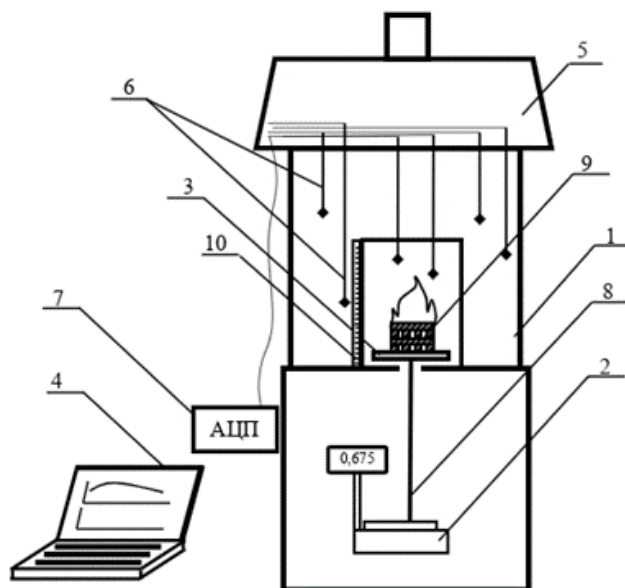


Рис.3. Схема экспериментальной установки: 1 – макет помещения; 2 – электронные весы; 3 – поддон; 4 – компьютер; 5 – зонт системы вентиляции; 6 – термодатчики (термопары); 7 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 8 – шток; 9 – модельный очаг пожара (деревянный штабель); 10 – измерительная линейка

Результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента представлены на Рис.4.

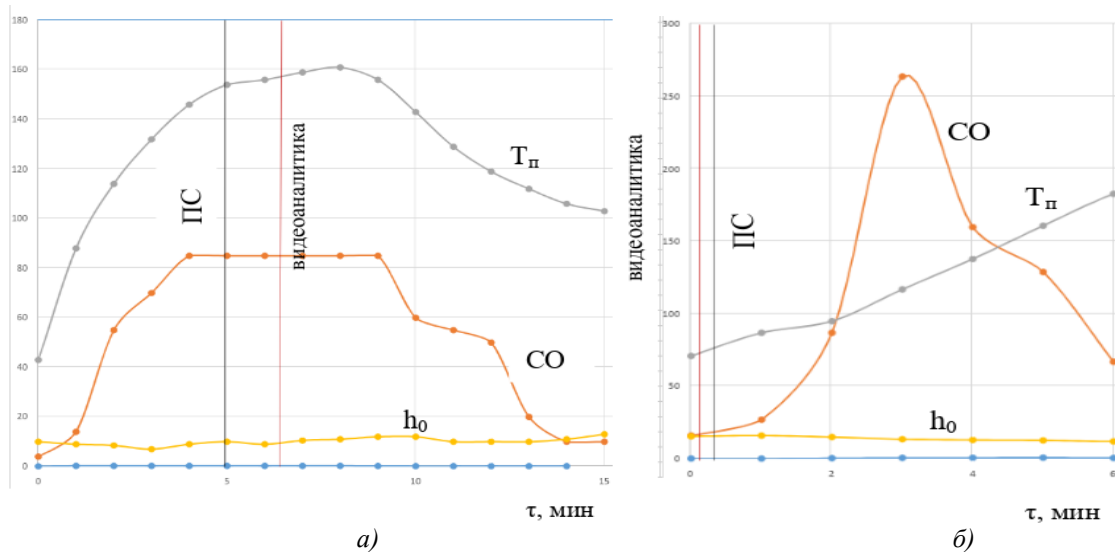


Рис.4. Зависимость параметров пожара от времени (τ , мин): а) в режиме ПРВ, б) в режиме ПРН, где, h_0 – высота плоскости равных давлений (см), T_p – температура пожара ($^{\circ}\text{C}$), CO – концентрация угарного газа (ppm), ПС – время срабатывания проводной сигнализации, видеоаналитика – время срабатывания ИПВ

Результаты сравнительного исследования традиционной проводной системы пожарного обнаружения (ПС) и системы видеоаналитики на базе извещателя с видеоканалом (ИПВ) показывают, что обе технологии способны обнаруживать очаги возгорания до достижения смертельно опасных концентраций CO. Однако их эффективность существенно зависит от характера горения:

– при режиме «пожар, регулируемый вентиляцией» (ПРВ) проводная ПС срабатывает в среднем на 4,56 минуты, опережая видеоаналитику (5,83 минуты). Задержка ИПВ в условиях недостаточной видимости и слабого дымообразования, вероятно, обусловлена пороговой логикой детекции визуальных признаков, чувствительность которой ниже при низкой плотности дыма.

– при режиме «пожар, регулируемый нагрузкой» (ПРН) видеоаналитика демонстрирует практически мгновенную реакцию (0,1 минуты), значительно превосходя проводную систему, которая срабатывает примерно через 2,7 минуты. Высокая теплоотдача и плотное дымовое облако позволяют видеодетектору быстро зафиксировать присутствие огня и дыма.

Таким образом, ИПВ и ПС обладают взаимно дополняющими преимуществами: традиционная проводная система более надежна в условиях слабой дымовой плотности, а видеоаналитический детектор – в интенсивных пожарах с активным горением и плотным задымлением.

Совмещенное использование ПС и ИПВ позволит покрыть весь спектр возможных режимов горения. Рекомендуется интегрировать видеоаналитику в качестве дополнительного канала детекции в тех зонах, где возможны быстроразвивающиеся пожары (склады легковоспламеняющихся материалов, производственные объекты с высокой тепловой нагрузкой).

Настройка пороговых уровней детекции для ИПВ. Для оптимальной скорости и точности работы в режиме ПРВ следует адаптировать порог вероятности обнаружения дыма и пламени в ИПВ. Рекомендуется провести калибровочные тесты в реальных условиях объекта и снизить рабочий порог при недостаточном освещении или слабом задымлении, чтобы минимизировать задержку срабатывания.

Обеспечение защитных мер против ложных тревог. При установке ИПВ необходимо предусмотреть алгоритмы фильтрации факторов, способных вызвать ложные срабатывания

(прожекторы, сварочные работы, пыль). Это может быть достигнуто за счет постобработки сигнала с учётом длительности визуального сигнала и динамики изменения площади поражения.

Список источников

1. Основы пожарной безопасности на объектах защиты: Учебное пособие)/А.В. Мещеряков, А.М. Алешков, М.А. Гудков [и др.] – М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. – 170с.
2. ГОСТ 34698-2020. Извещатели пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний: текст / введ. 2023-07-01 – Москва: Стандартиформ, 2020 – 48 с. – URL: <https://czbt.ru/wp-content/uploads/2023/07/GOST-34698-2020-Izveshhateli-pozharnye.-Obshhie-tehnicheskie-trebovaniya.-Metody-ispytaniy-s-PopravkojTekst.pdf> (дата обращения: 17.09.2025).
3. Извещатели пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний. Документ: 1200180194/Титул 7D80K5 / ФГУП «ЦКБ АСЭ» – Москва, 2020. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180194/titles/7D80K5> (дата обращения: 17.09.2025).
4. СП 484.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем противопожарной защиты. Нормы и правила проектирования. // КонсультантПлюс. – URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=LAW&n=502595&dst=100003&demo=1> (дата обращения: 17.09.2025).
5. Основные причины пожаров за 12 месяцев 2024 года // АрхГород. – URL: <https://www.arhcity.ru/?page=246065> (дата обращения: 17.09.2025).
6. Новости МЧС России. Статистика пожаров за год // МЧС РФ. – URL: <https://67.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/5356463> (дата обращения: 17.09.2025).
7. Основные показатели пожарной обстановки в Златоусте // Администрация Златоуст. – URL: <https://zlat-go.ru/about/news/osnovnye-prichiny-pozharov-za-12-mesyatsev-2024-goda> (дата обращения: 17.09.2025).
8. Пожарная отрасль в огне реформ: инфографика // ru-bezh.ru. – URL: <https://ru-bezh.ru/infografika/pozharnaya-otrasl-v-ogne-reform> (дата обращения: 17.09.2025).
9. Теоретические основы процессов горения и тушения пожаров: учебное пособие: в 2 ч. Ч. 2 / Гапеев А. А., Герасимова И. Н., Гудков М. А. [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2024. – 212 с.

References

1. Osnovy pozharnoj bezopasnosti na obektah zashhity: Uchebnoe posobie)/A.V. Meshherjakov, A.M. Aleshkov, M.A. Gudkov [i dr.] – M. : Akademija GPS MChS Rossii, 2023. – 170s.
2. GOST 34698-2020. Izveshhateli pozharnye. Obshhie tehicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy: tekst / vved. 2023-07-01 – Moskva: Standartinform, 2020 – 48 s. – URL: <https://czbt.ru/wp-content/uploads/2023/07/GOST-34698-2020-Izveshhateli-pozharnye.-Obshhie-tehnicheskie-trebovaniya.-Metody-ispytaniy-s-PopravkojTekst.pdf> (accessed: 17.09.2025).
3. Izveshhateli pozharnye. Obshhie tehicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy. Dokument: 1200180194/Titul 7D80K5 / FGUP «CKB ASJe» – Moskva, 2020. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180194/titles/7D80K5> (accessed: 17.09.2025).
4. SP 484.1311500.2020. Sistemy protivopozharnoj zashhity. Sistemy pozharnoj signalizacii i avtomatizacija sistem protivopozharnoj zashhity. Normy i pravila proektirovaniya. // Konsul'tantPljus. – URL: <https://login.consultant.ru/link/?req=doc&base=LAW&n=502595&dst=100003&demo=1> (accessed: 17.09.2025).
5. Osnovnye prichiny pozharov za 12 mesjacev 2024 goda // ArhGorod. – URL: <https://www.arhcity.ru/?page=246065> (accessed: 17.09.2025).
6. Novosti MChS Rossii. Statistika pozharov za god // MChS RF. – URL: <https://67.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/5356463> (accessed: 17.09.2025).
7. Osnovnye pokazateli pozharnoj obstanovki v Zlatouste // Administracija Zlatoust. – URL: <https://zlat-go.ru/about/news/osnovnye-prichiny-pozharov-za-12-mesyatsev-2024-goda> (accessed: 17.09.2025).

8. Pozharnaja otrasl' v ogne reform: infografika // ru-bezh.ru. – URL: <https://ru-bezh.ru/infografika/pozharnaya-otrasl-v-ogne-reform> (accessed: 17.09.2025).

9. Teoreticheskie osnovy processov gorenija i tushenija pozharov : uchebnoe posobie : v 2 ch. Ch. 2 / Gapeev A. A., Gerasimova I. N., Gudkov M. A. [i dr.]. – M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2024. – 212 s.

Информация об авторах

М.А. Гудков – кандидат технических наук, доцент

А.А. Гапеев – кандидат химических наук, доцент

С.А. Гречаный – кандидат технических наук, доцент

Д.Ю. Калков – кандидат технических наук

Ю.Н. Коваль – кандидат биологических наук, доцент

Information about the author

M. A. Gudkov - Ph.D. of Engineering, Associate Professor

A.A. Gapeev – Ph.D. of Chemical Sciences, Associate Professor

S.A. Grechany – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor

D.Y. Kalkov - Ph.D. of Engineering

Yu.N. Koval – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025, одобрена после рецензирования 15.12.2025, принята к публикации 20.12.2025.

The article was submitted 14.11.2025, approved after reviewing 01.12.2025, accepted for publication 20.12.2025.