

Научная статья
УДК 614.841
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.21.53.021

Комплексные системы обнаружения пожара на ранней стадии

*Сергей Петрович Амельчугов
Алексей Николаевич Батуро
Николай Викторович Мартинович
Анна Владимировна Брот
Юлия Николаевна Неприятель*

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

Автор, ответственный за переписку: Николай Викторович Мартинович, martin-nv@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы обнаружения пожаров на ранней стадии его развития с учетом разных газовых составов среды. Отмечено, что газовая среда внутри помещения до и во время пожара находится в постоянном изменении. Именно этот факт возможно использовать при разработке приборов обнаружения пожара. Важное значение имеет не сами значения концентрации того или иного газа в соответствующий период времени, а их скорость изменения по отношению друг к другу. На основании этих положений рассматривается возможность применения новой системы обнаружения пожара по индикаторным газам, которая может быть предназначена для непрерывного контроля газовой среды в помещениях производственного и другого назначения.

Авторами предложена комплексная система обнаружения пожара по индикаторным газам и тепловому излучению. Комплексное использование двух факторов пожара, его газовыделение и тепловое излучение позволяет создавать системы обнаружения пожара на ранней стадии. Применение современных способов обработки информации значительно повышает технические характеристики этих систем обнаружения пожаров. Решение, описанное авторами, может использоваться в пожарной робототехнике и позволяет наводить пожарные стволы не только с заданной точностью, но и менять тактику подачи огнетушащих веществ при изменении оперативной ситуации.

Ключевые слова: пожарная безопасность, горючая нагрузка, тепловое излучение, индикаторные газы, система

Для цитирования: Амельчугов С.П., Батуро А.Н., Мартинович Н.В., Брот А.В., Неприятель Ю.Н. Комплексные системы обнаружения пожара на ранней стадии // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 223-230.
<https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.21.53.021>.

Original article.

Comprehensive fire detection systems at an early stage

Sergei P. Amelchugov

Aleksei N. Baturо

Nikolai V. Martinovich

Anna V. Brot

Yuliya N. Nepriyatel

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

Corresponding author: *Nikolai V. Martinovich, martin-nv@mail.ru*

Abstract. The article considers the issues of detecting fires at an early stage of their development, taking into account different gas compositions of the environment. It is noted that the gas environment inside the premises is constantly changing before and during a fire. This fact can be used in the development of fire detection devices. It is not the concentration values of a particular gas in the corresponding period of time that are of great importance, but their rate of change in relation to each other. Based on these provisions, the possibility of using a new fire detection system based on indicator gases is considered, which can be designed for continuous monitoring of the gas environment in industrial and other premises. The authors propose a comprehensive fire detection system based on indicator gases and thermal radiation. The integrated use of two fire factors, its gas emission and thermal radiation, allows creating fire detection systems at an early stage. The use of modern methods of information processing significantly improves the technical characteristics of these fire detection systems. The solution described by the authors can be used in fire robotics and allows directing fire nozzles not only with a given accuracy, but also changing the tactics of supplying fire extinguishing agents when the operational situation changes.

Keywords: fire safety, combustible load, thermal radiation, indicator gases, system

For citation: Amelchugov S.P., Baturо A.N., Martinovich N.V., Brot A.V., Nepriyatel Y.N. Comprehensive fire detection systems at an early stage // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 223-230. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.21.53.021>.

Современные системы противопожарной защиты сталкиваются с серьезной проблемой: возникающие пожарные извещатели обладают высокой инерционностью и недостаточной надежностью обнаружения пожара на начальных стадиях. По данным ВНИИПО МЧС России, до 40 % пожаров обнаруживаются только на стадии открытого горения, что значительно увеличивает материальный ущерб и риски для жизни людей. Несмотря на наличие технических регламентов, определяющих требования к системам противопожарной защиты [1,2], существующие решения не в полной мере позволяют своевременно выявлять процессы самовозгорания и перегрева оборудования, которые составляют до 25 % всех пожаров на промышленных объектах.

Современный рынок пожарной сигнализации представлен различными типами извещателей: дымовыми, тепловыми, пламенными и комбинированными. Однако, как показывает анализ, все они имеют некоторые ограничения. Дымовые извещатели эффективны только при наличии видимого дыма, что обычно соответствует уже развитой стадии пожара. Тепловые извещатели реагируют на снижение температуры, что также происходит на достаточно поздней стадии. Извещатели пламени эффективны только при наличии открытого пламени.

Существуют и более современные решения, такие как системы видеоаналитики на базе камер Axis и ПО SmokeCatcher компании Araani [3], а также интегрированные решения для обнаружения пожара (IDIS/Technoaware). Однако у этих систем есть свои ограничения: системы видеоаналитики неэффективны при наличии технологических паров, атмосферных паров особенно при низких температурах окружающей среды, инфракрасные датчики могут подавать ложные сигналы при наличии других источников тепла.

Особое внимание следует уделить системами, основанными на анализе газовой среды. Согласно исследованиям Ветошкина А.Г. [4], на стадии тления характерно возникновения индикаторных газов, концентрация которых меняется соответствующим образом. Однако газоанализаторы, такие как системы, описанные в источнике [5], фокусируются на абсолютных значениях датчиков, что приводит к высокому уровню ложных срабатываний или позднего обнаружения пожароопасного инцидента.

Согласно классификации, принятой в научных работах [6-8], пожар имеет четыре стадии: начальную, развивающуюся, развитую и затухающую. В ходе анализа проведенных исследования установлено, что на каждой стадии происходят характерные изменения газового состава среды.

На начальной стадии (тление) продуктов пиролиза (CO , формальдегид, ацетальдегид и т.д.) при температуре $150\text{--}300^\circ\text{C}$. Отсутствует видимый дым и пламя. На развивающейся стадии появляется дым, увеличивается концентрация CO_2 , органических оксидов азота. На развитой стадии наблюдается интенсивное горение с образованием пламени, высокая концентрация CO_2 и других продуктов горения. Температура повышается до 600°C и выше. [9].

Анализ газовой среды, проведенный в исследовании [8] показывает, что на этапе тления наблюдается характерное соотношение концентраций газа. Ключевые индикаторные газы и включают углекислый газ (CO_2), концентрация которого увеличивается плавно, начиная с 400 ppm (нормальный уровень) до 1000-2000 ppm; оксид кислорода (CO), концентрация которого резко увеличивается с 10 ppm до 50-100 ppm и выше; и летучие органические соединения (ЛОС), концентрация которых увеличивается экспоненциально. При этом необходимо отметить, что критическим показателем становится не абсолютное значение емкости газа, а скорость его изменения относительно других газов.

На основании этих положений [5] и ранее проведенных исследований [10-12] авторами предложена новая система обнаружения пожара по индикаторным газам (Рис.1 и Рис.2), предназначенная для непрерывного контроля газовой среды в помещениях производственного и другого назначения.

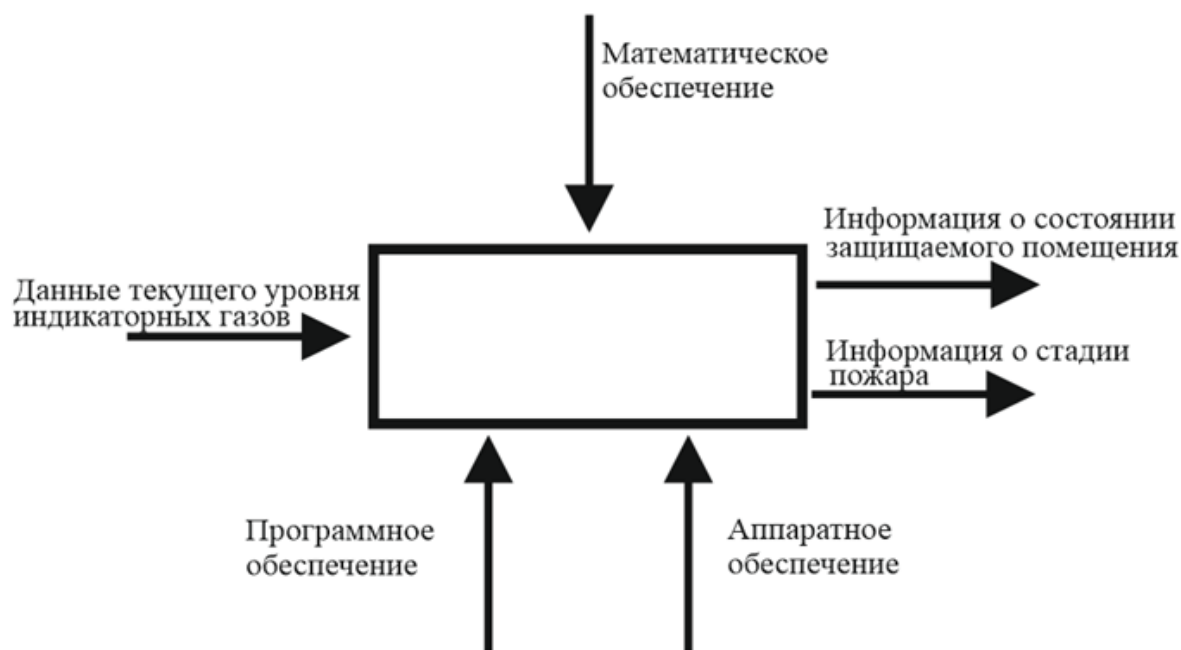


Рис.1. Функциональная модель системы обнаружения пожара по индикаторным газам – контекстная диаграмма

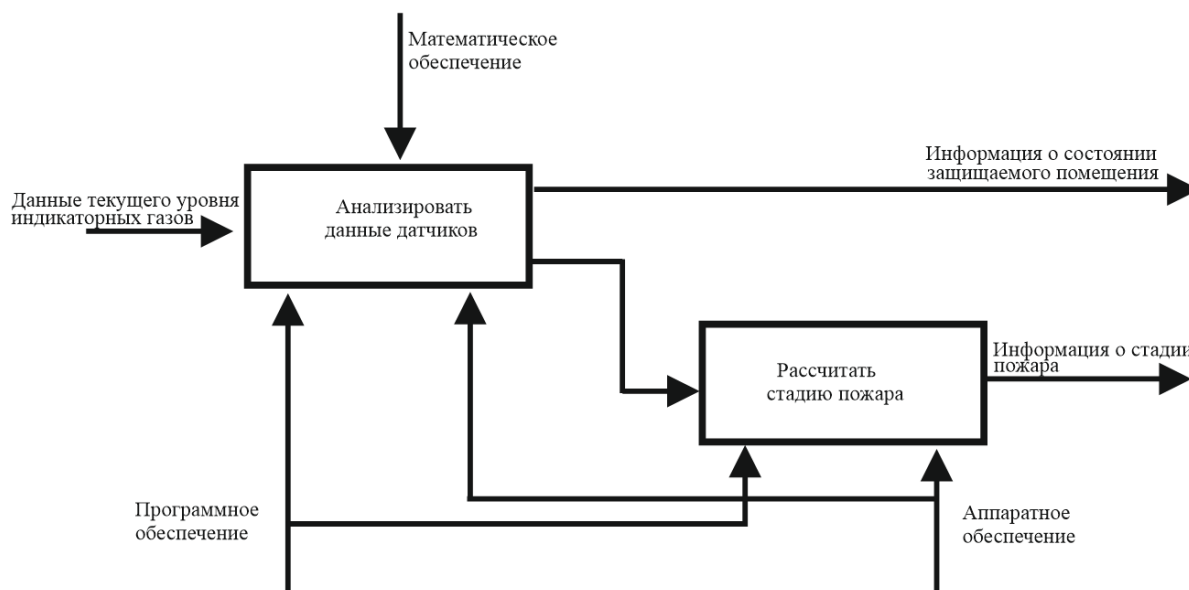


Рис.2. Функциональная модель системы обнаружения пожара по индикаторным газам – декомпозиция контекстной диаграммы

Основные функции системы обнаружения:

- динамический газовый мониторинг защищаемого объекта;
- установление концентрации и определение скоростей прироста/убывания газовых проявлений, предшествующих пожару, аварии, взрыву;
- выявление стадии пожара.

Обнаружение местоположения очага возгорания определяется путем расчета и сравнения, основанного на числовых значениях, получаемых с датчиков, расположенных в контролируемой зоне.

Другим опасным фактором пожара является тепловое поток согласно [2]. Тепловое излучение (поток) тлеющего материала подчиняется закону Стефана-Больцмана и записывается как (1):

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad (1)$$

где, E_0 – мощность теплового потока, Вт/м²,

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²К⁴, ($5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м²К⁴)

T – температура поверхности тела, К.

Температура пламени пожара зависит от состава исходной смеси органических веществ и условий, при которых осуществляется горение. Однако, даже в режиме тления температура поверхности материала, учитывая начальные стадии механизма самовозгорания, превышает 300°C, [9,13] что явно достаточно для регистрации возникающего пожара. Особую ценность тепловое излучение пожара, в качестве обнаруживающего фактора, приобретает при понимании, что большинство пожаров, так или иначе, связаны с нагревом углеродных материалов и выделением углекислого газа. Пик излучения молекул углекислого газа приходится на 4,3 мкм, а в этом диапазоне «шум» от солнца, воды и т.д. относительно невелик, поэтому сигнал выделить несложно путем отсека оптическими фильтрами, как показано на Рис.3.

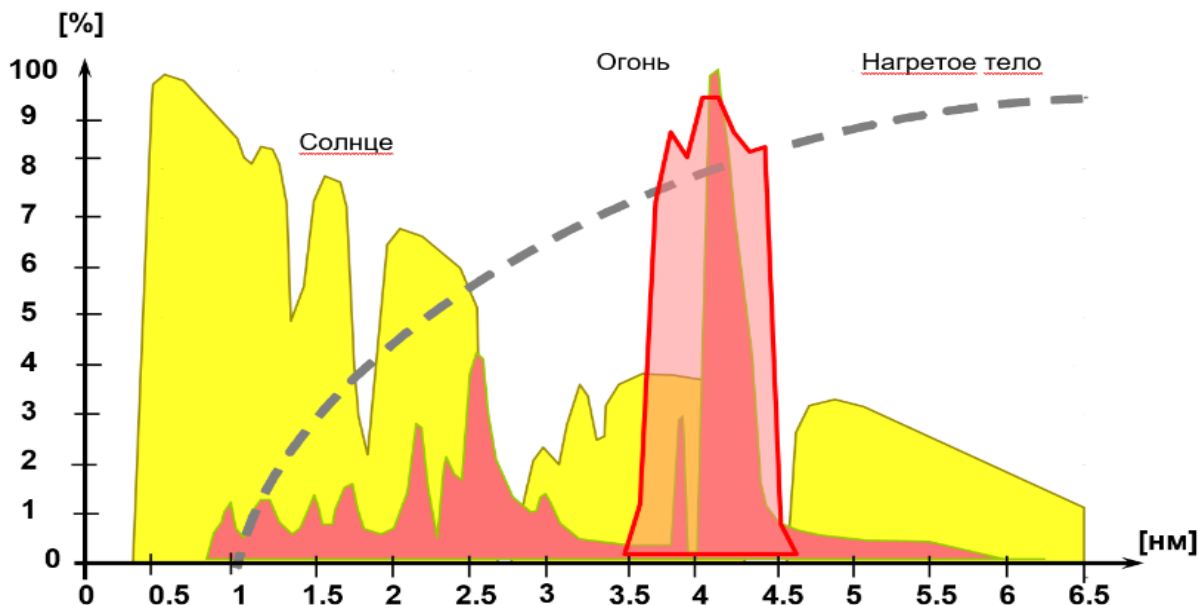


Рис.3. Схема обнаружения пожара

Анализ применения принципа контроля теплового поля в ИК-диапазоне показал его высокую обнаруживающую способность на ранней стадии пожара. На основании этих данных предлагается новый датчик теплового потока, предназначенный для непрерывного контроля теплового поля в диапазоне ИК-излучения в помещениях различного назначения и на открытых площадках [10,14].

Предлагаемая комплексная система обнаружения пожара включает в себя два основных компонента: систему газового анализа и систему теплового Диптиха. Эти компоненты объединяются в единую систему через центральный процессор, осуществляя комплексную обработку данных.

Система газового анализа включает в себя газовые датчики (например: электрохимические для CO , CO_2 , полупроводниковые для ЛОС), блок обработки сигналов, модульный сигнал и интерфейс связи с центральным процессором. В отличие от существующих решений, система анализирует не абсолютные значения величин, а их производные во времени. Ключевой элемент методологии определения стадии пожара основан на коэффициенте соотношения скоростей изменения концентраций газа (R). Данный коэффициент представляет собой отношение скорости нарастания частиц оксида к скорости нарастания частиц углекислого газа. Это относительный показатель, который позволяет исключить фоновые колебания и ложные срабатывания.

Другими словами, в дифференциальной форме этот коэффициент характеризует относительную скорость изменения содержания оксида углерода при изменении скорости содержания остатков углекислого газа, что является ключевым критерием для определения стадии в предлагаемой системе обнаружения пожара и может быть формализовано в следующем виде (2), (3):

$$R = \frac{\frac{d(\text{CO})}{dt}}{\frac{d(\text{CO}_2)}{dt}} \text{ при } R > 0,05 \text{ и } \frac{d(\text{CO})}{dt} > 0,5 \text{ ppm/c} \quad (2)$$

Или в эквивалентной форме:

$$\frac{\frac{d(\text{CO})}{dt}}{\frac{d(\text{CO}_2)}{dt}} > 0,05 \text{ и } \frac{d(\text{CO})}{dt} > 0,5 \text{ ppm/c} \quad (3)$$

Таким образом, предлагаемая система также включает инфракрасные датчики с фильтрацией на 4,3 мкм, блок обработки сигналов, модуль и интерфейс связи с центральным процессором.

Для определения координат очага возгорания используется метод триангуляции на основе показаний нескольких датчиков. Если I_1, I_2, I_3 - результат преобразования, полученный с помощью трех датчиков, рассчитанных в точках $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, то координаты источника (x_0, y_0) вычисляются из системы определения, описывающей преобразование квадратичной зависимости от расстояния до источника.

Обнаружение местоположения очага возгорания определяется путем расчета, основанного на числовых значениях, получаемых с датчиков теплового потока, расположенных в контролируемой зоне (Рис.4).

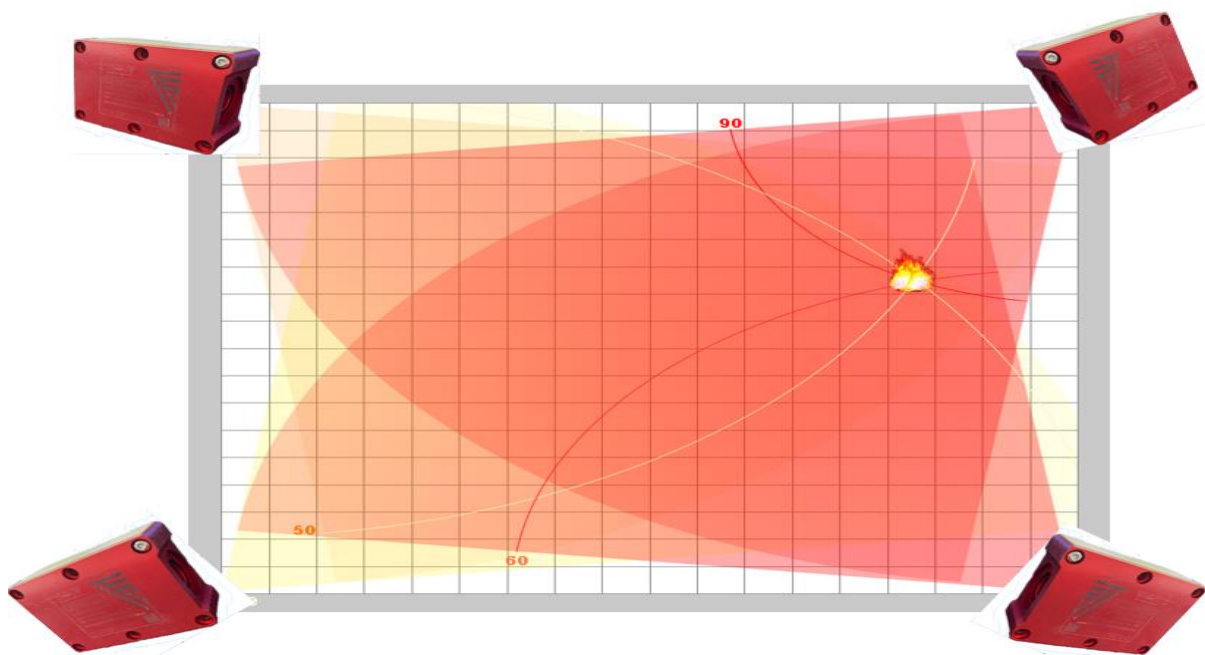


Рис.4. Общий принцип обнаружения координаты пожара по ИК потоку

Центральный процессор выполняет комплексную обработку данных от газовых и тепловых датчиков. Он вычисляет производные концентрации газа, определяет соотношение производных, анализирует тепловое поле и устанавливает координаты возможного источника. Для принятия решения о наличии пожара применяют нечеткую логику, учитывающую как соотношение скоростей изменения газа, так и градиент температурного поля.

Важным дополнением к системе является модуль учета параметров помещения. Геометрические параметры помещения, система вентиляции, тип помещения и температурный фон влияют на распространение газа и тепла, поэтому эти параметры используются для определения алгоритмов адаптации к данным условиям. Например, в помещениях с высокой кратностью вентиляции повышаются пороговые значения скоростей изменения газовых концентраций.

Особая практическая значимость предлагаемой системы, в полной мере раскрывается при применении в совокупности с пожарной робототехникой. Это позволяет не только точно определять координаты очага возгорания, но и анализировать стадию пожара для выбора оптимальной тактики тушения. Так, например на стадии тления эффективнее использовать газовые составы, тогда как на стадии открытого горения требуется подача воды или пены, а система позволяет автоматически переключать режимы подачи огнетушащих веществ в зависимости от текущей стадии пожара. Основной отличительной особенностью предлагаемого решения является разработка научно-обоснованных методов комплексного анализа скоростей изменения концентраций различных газов друг с другом в качестве основных

критериев для обнаружения пожара на стадии тления. В отличие от существующих решений, фокусирующихся на абсолютных значениях элементов, предлагаемая система анализирует динамику изменения газового состава, что позволяет снизить уровень ложных приборов и повысить чувствительность обнаружения.

Перспективы текущих исследований включают интеграцию с последовательной видеоаналитикой для повышения надежности, разработку адаптивных алгоритмов для различных типов горючих материалов и оптимизацию энергопотребления для автономной работы датчиков. Полученные результаты имеют как научную, так и практическую значимость и позволяют снизить ущерб от пожаров за счет их раннего обнаружения и предотвратить переход в стадию открытого горения.

Список источников

1. Федеральный закон от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Консультант Плюс. – URL: // https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/.
2. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ (ред. от 25.12.2023) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» // Консультант Плюс. – URL: // https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/.
3. Информационный ресурс. Технологии защиты URL: // <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=1627&uid2=1663&uid3=1675>.
4. Ветошкин А.Г. Основы инженерной защиты окружающей среды. – г. Вологда: Инфа-Инженерия, 2016 г. – 464 с.
5. Амельчугов С.П. Влияние диоксида углерода на процесс самовозгорания бурых углей. Пожаровзрывобезопасность. - 1992. - № 2. - С. 25-27.
6. Молчадский И.С. Пожар в помещении. – М. : ВНИИПО, 2005. – 456 с.
7. Абдурагимов, И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров [Текст] / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: ВИПТШ, 1980. – 255 с.
8. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с. ISBN – 59229-0011-0.
9. Лыков, А.В. Теория теплопроводности: учебное пособие [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высшая Школа, 1967. – 600 с.
10. Амельчугов С.П., Горностаев Р.В., Анисимов О.В., Севастьянов Е.В. и др. Построение систем обнаружения пожаров, основанных на регистрации индикаторных газов, Пожарная безопасность. – 2007 - №4. С.45-48.
11. Батуро А.Н. Система обнаружения предпожарных состояний на основе контроля индикаторных газов / А.Н. Батуро, А.В. Антонов, Н.В. Мартинович // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2010. – Т. 1, № 1(1). – С. 339-340.
12. Фёдоров А.В., Членов А.Н., Лукьянченко А.А., Буцынская Т.А., Демёхин Ф.В. Системы и технические средства раннего обнаружения пожара: Монография / А.В. Федоров и др. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. - 160 с.
13. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела: учебник для вузов. В 2 т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – Т.1. – 399 с.
14. Амельчугов С.П. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Инфракрасный детектор локальных перегревов Информационный листок. – Красноярск: ЦНТИ, 1993.– № 38 – С. 93–98.

References

1. Federal Law No. 384-FZ of December 30, 2009 "Technical Regulations on the safety of buildings and structures" // Consultant Plus. – URL: // https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/.
2. Federal Law No. 123-FZ of 07/22/2008 (as amended on 12.25.2023) "Technical Regulations on Fire Safety requirements" // Consultant Plus. – URL: // https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/.
3. Information resource. URL protection technologies: // <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=1627&uid2=1663&uid3=1675> svobodny.

4. Vetoshkin A.G. Fundamentals of engineering environmental protection. Vologda: Infa-Engineering, 2016 - 464 p.
5. Amelchugov S.P. The effect of carbon dioxide on the process of spontaneous combustion of brown coals. Fire and explosion safety. - 1992. - No. 2. - pp. 25-27.
6. Molchadskiy I.S. Fire in the room. – М.: VNIPO, 2005. – 456 p.
7. Abduragimov, I.M. Physico-chemical foundations of the development and extinguishing of fires [Text] / I.M. Abduragimov, V.Y. Govorov, V.E. Makarov. Moscow: VIPTSH, 1980. 255 p.
8. Koshmarov Yu.A. Forecasting of fire hazards in a room: A textbook. Moscow: Academy of GPS of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000. 118 p. ISBN – 59229-0011-0.
9. Lykov, A.V. Theory of thermal conductivity: a textbook [Text] / A.V. Lykov. Moscow: Higher School, 1967. 600 C.
10. Amelchugov S.P., Gornostaev R.V., Anisimov O.V., Sevastyanov E.V. and others. Construction of fire detection systems based on the registration of indicator gases, Fire safety. - 2007 - No. 4. pp.45-48.
11. Baturo A.N. A system for detecting pre-fire conditions based on monitoring indicator gases / A.N. Baturo, A.V. Antonov, N.V. Martinovich // Fire safety: problems and prospects. - 2010. – Vol. 1, No. 1(1). – pp. 339-340.
12. Fedorov A.V., Members A.N., Lukyanchenko A.A., Butsynskaya T.A., Demekhin F.V. Systems and technical means of early fire detection: A monograph / A.V. Fedorov et al., Moscow: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2009. 160 p.
13. Ashcroft, N. Solid state physics: a textbook for universities. In 2 volumes / N. Ashcroft, N. Mermin. – М.: Mir, 1979. – Vol. 1. – 399 p.
14. Amelchugov S.P. Kashkin V.B., Sukhinin A.I. Infrared detector of local overheating Information sheet. Krasnoyarsk: TsNTI, 1993, No. 38– pp. 93-98.

Информация об авторах

С. П. Амелчугов – доктор технических наук, профессор

А. Н. Батуру – кандидат технических наук, доцент

Н.В. Мартинович – кандидат технических наук

Information about the author

Sergei P. Amelchugov – Grand PhD in Engineering sciences, professor

Aleksei N. Baturo – Ph.D. of Engineering, Associate Professor

N.V. Martinovich – Ph.D. of Engineering Sciences

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 25.07.2025, одобрена после рецензирования 01.09.2025, принята к публикации 05.09.2025.

The article was submitted 25.07.2025, approved after reviewing 01.09.2025, accepted for publication 05.09.2025.