

Перспективы применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов

Ринат Валерьевич Халиков¹✉, Владимир Васильевич Роечко¹,
Ильдар Рафатович Бегишев¹, Татьяна Николаевна Халикова¹,
Антон Дмитриевич Корольченко²

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных проблем системы обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики является предотвращение пожаров горючих газов. Анализ существующих систем предотвращения пожаров показал низкую эффективность их работы. Для предотвращения пожаров горючих газов в рамках настоящей работы предлагается использование водной среды в метастабильном фазовом состоянии.

Цель. Исследование особенностей водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах.

Задачи. Анализ существующих средств системы предотвращения пожаров газов. Обоснование расчетами возможности применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах. Моделирование процесса флегматизации метана в замкнутом объеме водной средой в метастабильном фазовом состоянии и определение оптимальных параметров ее подачи.

Методика исследования. Определение необходимости применения нового средства предотвращения пожаров газов на объектах энергетики было обосновано с использованием метода анализа и синтеза. Для обоснования возможности предотвращения пожаров метана в замкнутом объеме было применено математическое моделирование на базе программно-аппаратного комплекса Pyrosim.

Теоретические основы. Для расчета минимальной флегматизирующей концентрации был применен закон Гесса и теория разветленно-цепных процессов горения.

Результаты и обсуждение. На основании проведенных расчетов было установлено количество технических средств подачи для различной степени негерметичности помещения. Требуемое количество стволов линейно зависит от объема помещения. Стоит отметить, что при достижении определенного коэффициента негерметичности, что будет соответствовать подаче водной среды в метастабильном фазовом состоянии в открытое пространство, количество стволов будет принимать максимальное значение для данного объема. Математическим моделированием было определено, что целесообразно устанавливать устройство подачи водной среды в метастабильном фазовом состоянии на боковых поверхностях, а достижение флегматизирующих концентраций наступает в течение 10 сек с момента подачи.

Выводы. Методом анализа установлено, что существующие системы предотвращения пожара недостаточно эффективны, так как в некоторых случаях могут привести к появлению локального возгорания. Предложен и теоретически обоснован способ предотвращения пожаров горючих газов водной средой в метастабильном фазовом состоянии в замкнутых объемах на объектах энергетики. Произведен расчет необходимого количества технических средств подачи водной среды в метастабильном фазовом состоянии в зависимости от объема помещения и коэффициента негерметичности. Применение программно-аппаратного комплекса Pyrosim подтвердило правильность выполненных расчетов и позволило установить оптимальный способ подачи водной среды в метастабильном фазовом состоянии в объем машинного зала теплоэлектростанции.

Ключевые слова: утечка газа; флегматизация горения; безопасность объектов энергетики; объемное пожаротушение; моделирование

Для цитирования: Халиков Р.В., Роечко В.В., Бегишев И.Р., Халикова Т.Н., Корольченко А.Д. Перспективы применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 4. С. 97–107. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.97-107

✉ Халиков Ринат Валерьевич, e-mail: vokilah@rambler.ru

Prospects of using an aqueous medium in a metastable phase state to prevent combustible gas fires

Rinat V. Khalikov¹✉, Vladimir V. Roenko¹, Ildar R. Begishev¹, Tatyana N. Khalikova¹, Anton D. Korolchenko²

¹The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the main problems of the fire safety system of energy facilities is the prevention of combustible gas fires. An analysis of existing fire prevention systems showed low efficiency of their operation. In order to prevent combustible gas fires, the use of an aqueous medium in a metastable phase state is proposed in this work.

Purpose. Investigation of the characteristics of an aqueous medium in a metastable phase state to prevent combustible gas fires in closed volumes.

Objectives. An analysis of existing means of the gas fire prevention system. The calculations substantiate the possibility of using an aqueous medium in a metastable phase state to prevent fires of flammable gases in closed volumes. Modelling the process of phlegmatization of methane in a closed volume by an aqueous medium in a metastable phase state and determining the optimal parameters of its supply.

Materials and methods. The determination of the need to use a new means of preventing gas fires at energy facilities was justified using the method of analysis and synthesis. To substantiate the possibility of preventing methane fires in a closed volume, mathematical modelling based on the Pyrosim hardware and software complex was applied.

Theoretical bases. To calculate the minimum phlegmatizing concentration, Hess's law and the theory of branched-chain combustion processes were applied.

Results and discussions. Based on the calculations performed, the number of technical means of supply for different degrees of room leakage was established. The required number of barrels depends linearly on the volume of the room. It is worth noting that when a certain leakage coefficient is reached, which will correspond to the supply of an aqueous medium in a metastable phase state to an open space, the number of barrels will take the maximum value for a given volume. Mathematical modelling has established that it is advisable to install devices for feeding an aqueous medium in a metastable phase state on the side surfaces, and the achievement of phlegmatizing concentrations occurs within 10 seconds from the moment of feeding.

Conclusions. The analysis method has established that the existing fire prevention systems are not effective enough, since in some cases they can cause a fire. A method for preventing fires of combustible gases by aqueous medium in a metastable phase state in closed volumes at energy facilities is proposed and theoretically substantiated. The calculation of the required number of technical means of supplying an aqueous medium in a metastable phase state, depending on the volume of the room and the leak coefficient, is performed. The use of the Pyrosim software and hardware complex confirmed the correctness of the calculations performed and allowed to establish the optimal method of supplying an aqueous medium in a metastable phase state to the volume of the engine room of the thermal power plant.

Keywords: gas leakage; thermal phlegmatization; safety of energy facilities; volumetric firefighting; modelling

For citation: Khalikov R.V., Roenko V.V., Begishev I.R., Khalikova T.N., Korolchenko A.D. Prospects of using an aqueous medium in a metastable phase state to prevent combustible gas fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(4):97-107. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.04.97-107 (rus).

✉ Rinat Valerievich Khalikov, e-mail: vokilah@rambler.ru

Введение

Топливо-энергетический комплекс является одной из важнейших составляющих экономического развития Российской Федерации. При этом от надежности и бесперебойности систем газораспределения зависит стабильность работы объектов топливо-энергетического комплекса, обеспечивающих население электроэнергией, горячим водоснабжением и отоплением жилых и производственных помещений [1–5].

По состоянию на 2022 г. протяженность газопроводов, снабжающих промышленные предприятия, тепловые электрические станции, газовые отопительные и производственные котельные, составила 990 177,3 км.

В настоящее время по данным единой энергетической системы России на территории Российской Федерации расположено 87 теплоэлектростанций (ТЭЦ), основным видом топлива которых является природный газ, 67 газотурбинных электростанций (12 находятся на этапе строительства, 55 — в эксплуатации), а также эксплуатируется 15 газопоршневых электростанций, 1 газопоршневая электростанция находится на этапе строительства.

Общее количество газифицированных объектов энергетического комплекса представлено на рис. 1.

Данные диаграммы (рис. 1) подтверждают тенденцию ежегодного увеличения количества газифицированных промышленных объектов и объектов энергетического комплекса.

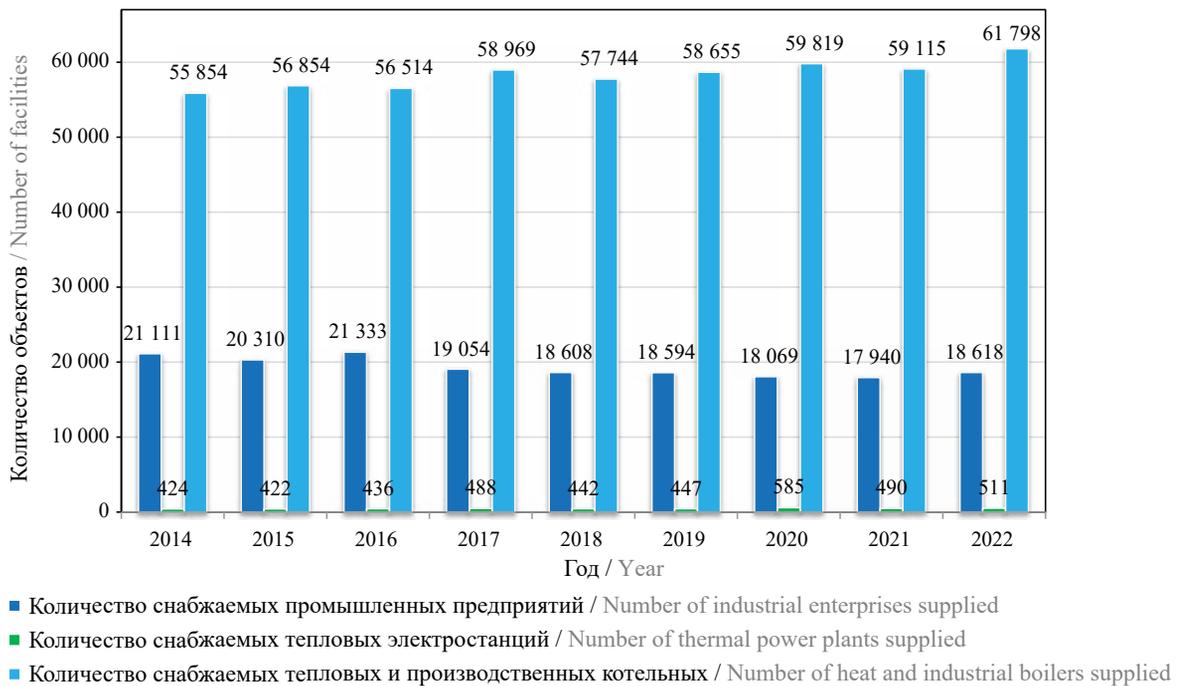


Рис. 1. Количество газифицированных объектов энергетики и промышленности
Fig. 1. Number of gasified energy and industrial facilities

Основным видом топлива на газотурбинных тепловых электростанциях является природный газ, который поступает по магистральным газопроводам в газораспределительные пункты. Пункты подготовки газа, помещения машинного зала, котельные отделения и иные помещения, в которых возможно повреждение технологического оборудования с последующей утечкой газа в окружающее пространство, представляют наибольшую пожарную опасность.

Согласно действующим нормативно-правовым актам при обнаружении аварийной утечки горючего газа в замкнутых объемах при достижении 10 % от нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) срабатывает светозвуковая сигнализация, а при концентрациях 20 и 50 % от НКПР включается система аварийной вентиляции. Таким образом вместе с вытеснением горючего газа в помещение обеспечивается поступление окислителя.

Положим, что в замкнутом объеме произошла утечка горючего газа. Система обнаружения утечки успешно сработала при 20 % от НКПР, при этом учтем, что обнаружение утечки горючего газа производится не по всему объему, а в конкретной точке. Допустим, что место утечки совпало с местом расположения газоанализатора, тогда при начале работы системы аварийной вентиляции концентрация газа во всем объеме будет уменьшаться и при закрытии аварийного трубопровода в скором времени достигнет нуля. Однако, если место утечки не совпадет с местом расположения датчика обнаружения, тогда перед началом работы системы аварийной вентиляции концентрация

горючего газа в конкретной точке может быть выше верхнего концентрационного предела распространения пламени (ВКПР). В таком случае такая мера противопожарной защиты как аварийная подача воздуха может привести к увеличению размеров зон взрывоопасных концентраций [6–9].

Таким образом, существует проблема с предотвращением и тушением пожаров на данных объектах. Существующие системы предотвращения пожаров газов и пожаротушения работают независимо друг от друга, это две совершенно разные системы, при этом эффективность предотвращения и тушения пожаров остается достаточно низкой [5]. Одним из наиболее эффективных средств пожаротушения, в том числе и газов, является водная среда в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС) (рис. 2) [6].

В работах [17–19] струя ВСМФС классифицируется как гетерогенный двухфазный поток с полидисперсной водокапельной и монодисперсионной паровой фазами. Предотвращение пожара горючего с помощью ВСМФС обеспечивается созданием газовой среды, в которой распространение пламени становится невозможным благодаря мелкодисперсным каплям воды, которые в течение длительного времени не осаждаются и находятся во взвешенном состоянии. Дополнительно будет происходить ингибирование, так как молекулы газа будут адсорбироваться на каплях ВСМФС, что не позволит инициировать возникновение горения и взрыва. Основными преимуществами предлагаемого способа будет его безопасность для

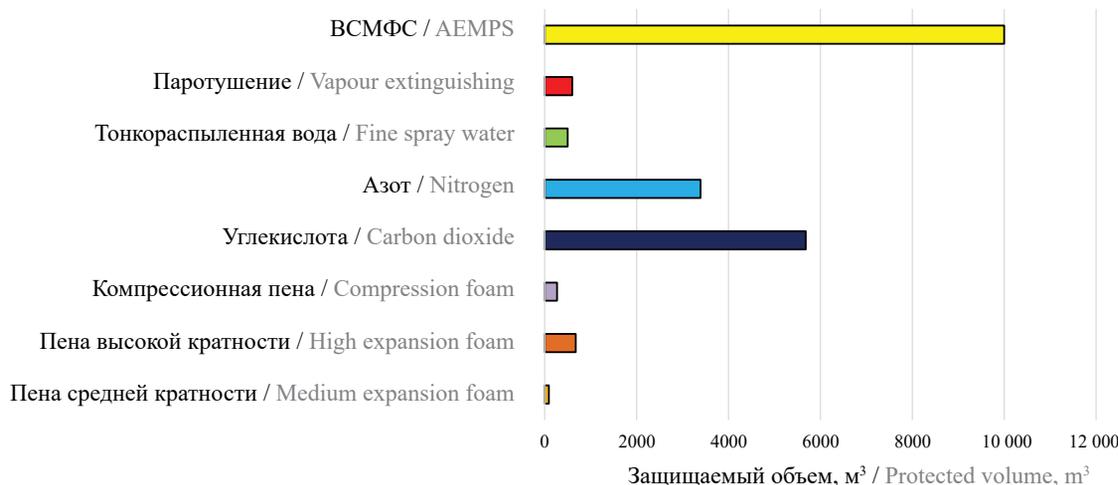


Рис. 2. Диаграмма зависимости величины защищаемого объема от вида огнетушащего вещества [5]
 Fig. 2. Diagram of the dependence of the size of the protected volume on the type of extinguishing agent [5]

людей, высокая эффективность и низкие финансовые затраты на обслуживание.

Таким образом, можно предположить, что можно создать комплекс, позволяющий использовать ВСМФС для тушения и предотвращения возникновения горения горючих газов. Однако исследований по возможности предотвращения пожаров горючих газов не проводилось. Для подтверждения данной возможности на первоначальном этапе целесообразно рассмотреть физическую сторону процесса.

Целью настоящего исследования является определение особенностей водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах. Для достижения данной цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие средства системы предотвращения пожаров газов.
2. Обосновать расчетами возможность применения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для предотвращения пожаров горючих газов в замкнутых объемах.
3. Смоделировать процесс флегматизации метана в замкнутом объеме водной средой в метастабильном фазовом состоянии и определить оптимальные параметры ее подачи.

Методика исследования и теоретические основы поставленной задачи. Выбор объекта моделирования

В [10–15] установлено, что струи ВСМФС являются эффективными при осаждении хлора, кроме того, теоретически обосновано, что ВСМФС обладает высоким сорбирующим эффектом. Однако природный газ слаборастворим в воде при нормальных условиях и его растворимость практически не зави-

сит от температуры. Таким образом, при подаче ВСМФС в замкнутый объем с газом мы получим гетерогенную смесь высокодисперсных капель воды и газа. Как известно, природный газ состоит преимущественно из метана CH₄, НКПР которого составляет 5,28 %, а ВКПР — 14,1 %.

Для того чтобы определить объем ВСМФС, необходимый для подачи в защищаемый объем, рассчитаем ее значение минимальной флегматизирующей концентрации (МФК) при разбавлении метановоздушной смеси. МФК будет определяться количеством флегматизатора, которое можно найти из условия предельной адиабатической температуры горения стехиометрической метановоздушной смеси [16], где T_T = 1500 К:

$$V_{\text{мфк}} = \frac{Q_{\text{н}} - (1500 - T_0) \cdot \sum C_{\text{рпгi}} \cdot V_{\text{пгi}}}{(1500 - T_0) \cdot C_{\text{рф}}}, \quad (1)$$

где Q_н — низшая теплота сгорания метана, кДж/моль; T₀ — температура в помещении, примем ее за 20 °С или 293 К;

C_{рпгi} — среднее значение адиабатической теплоемкости продуктов сгорания, кДж/(моль·К); V_{пгi} — количество продуктов сгорания, моль/моль; C_{рф} — среднее значение адиабатической теплоемкости флегматизатора, кДж/(моль·К).

Низшая теплота сгорания метана определяется по закону Гесса:

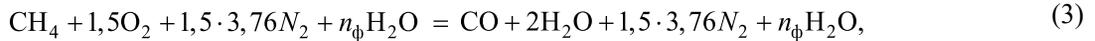
$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{\text{CO}}^0 + 2\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}^0 - \Delta H_{\text{CH}_4}^0, \quad (2)$$

где H_{CO}⁰, 2ΔH_{H₂O}⁰, ΔH_{CH₄}⁰ — теплота образования угарного газа, воды и метана соответственно.

Подставляя справочные данные теплоты образования, получим Q_н = 522,1 кДж/моль.

Для определения количества продуктов сгорания необходимо записать уравнение материального

баланса для горения метана при добавлении флегматизатора:



где $n_{\text{ф}}$ — число молей флегматизатора.

В соответствии с уравнением материального баланса (1) примет следующий вид:

$$V_{\text{мфк}} = \frac{Q_{\text{н}} - (1500 - T_0) \cdot (C_{\text{pCO}} \cdot V_{\text{CO}} + C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{pN}_2} \cdot V_{\text{N}_2})}{(1500 - T_0) \cdot C_{\text{pH}_2\text{O}}}. \quad (4)$$

Количество продуктов горения определим из правой части уравнения (3), а средние значения адиабатических теплоемкостей продуктов сгорания из справочных данных подставим в (4). Получим, что количество ВСМФС в помещении 3,51 моль/моль.

По данному количеству определим концентрацию ВСМФС в замкнутом объеме для обеспечения недопущения распространения пламени в среде по следующей зависимости:

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{V_{\text{мфк}} \cdot 100}{V_{\text{CH}_4} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{CH}_4}}. \quad (5)$$

По результатам расчетов было определено, что минимально флегматизирующая концентрация ВСМФС в замкнутом объеме составляет 30,6 %. Необходимо отметить, что данная концентрация для воды в газообразном состоянии, для того чтобы достигнуть такой концентрации температура ВСМФС должна быть порядка 70 °С. Однако необходимо понимать, что данный расчет не учитывает процессы ингибирования в замкнутом объеме, поэтому действительная концентрация ВСМФС будет существенно ниже. В целях нахождения действительной концентрации необходимо проведение экспериментальных исследований.

Для обоснования системы предотвращения и тушения пожаров газов ВСМФС горючих газов в замкнутом объеме необходимо определение количества технических средств подачи.

Количество технических средств подачи ВСМФС можно определить по следующей формуле:

$$N_{\text{уст}} = \frac{W \cdot \varphi_{\text{мфк}} \cdot K_{\text{не.грм}}}{Q_{\text{уст}} \cdot t}, \quad (6)$$

где W — объем помещения, м³;

$K_{\text{не.грм}}$ — коэффициент степени негерметичности помещения;

$Q_{\text{уст}}$ — расход технического средства подачи ВСМФС, м³/с;

t — необходимое время подачи ВСМФС, с, принимаем 30 с, согласно анализу статистических данных среднее время от момента возникновения сигнала с регистрирующего устройства и возникновения возгорания и(или) взрыва [16–26].

На основе (6) была построена зависимость (рис. 3) для различной степени негерметичности.

Как видно из зависимости (рис. 3), требуемое количество стволов линейно зависит от объема помещения, стоит также отметить, что график для коэффициента негерметичности $K = 0,3$ является случаем нормальной работы, когда работает система общеобменной вентиляции, случай для коэффициента $K = 0,4$ и $0,5$ является вариантом разгерметизации и вскрытия легкосбрасываемых конструкций. Стоит отметить, что при достижении данного коэффициента негерметичности $K = 1$, это будет соответствовать подаче ВСМФС в открытое пространство, количество стволов будет принимать максимальное значение для данного объема. Однако в данном случае речи о конкретном объеме идти не может, поэтому можно предположить, что применение данной формулы определено на интервале $K = [0; 0,5]$.

Для подтверждения установленной зависимости количества установок подачи ВСМФС от объема помещения целесообразно провести моделирование процесса заполнения объема ВСМФС на объекте энергетики. В качестве объекта исследования пред-

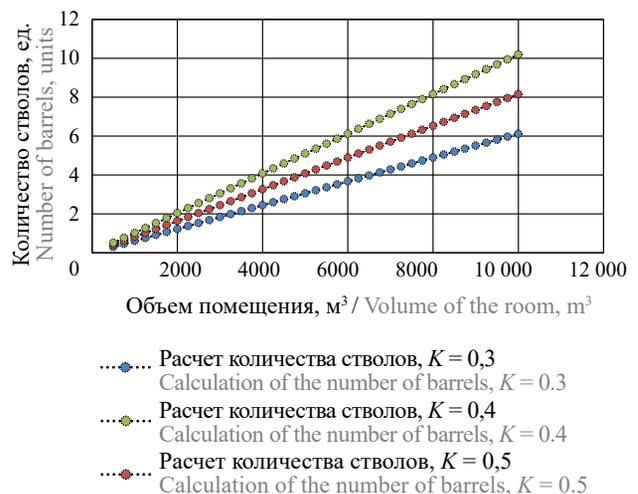
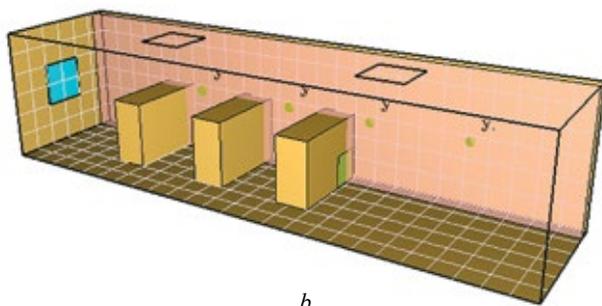


Рис. 3. Зависимость необходимого количества стволов для предотвращения возникновения пожара горючего газа в помещении в зависимости от объема помещения при различной степени негерметичности помещения

Fig. 3. Dependence of the number of barrels required to prevent a flammable gas fire in a room depending on the volume of the room at different degrees of room leakage



a



b

Рис. 4. Общий вид типового машинного зала ТЭЦ: *a* — фотография типового машинного зала; *b* — модель типового машинного зала ТЭЦ с расположенными внутри датчиками измерения концентрации метана, ВСМФС, устройствами подачи ВСМФС, проемами

Fig. 4. General view of a typical engine room of a TPP: *a* — photograph of a typical engine room; *b* — model of a typical engine room of a TPP with methane concentration sensors, AEMPS, AEMPS feeders, openings located inside

ложено выбрать типовой машинный зал ТЭЦ (рис. 4). В одном типовом машинном зале ТЭЦ стоит 3 газотурбинных агрегата и парогенераторные установки, при этом объем помещения, где располагается данное оборудование, был выбран $10\,000\text{ м}^3$ (рис. 4).

Геометрические и теплофизические параметры конструктивных элементов и материалов ТЭЦ были выбраны в соответствии с технической документацией. В машинных залах на уровне соединения технологической обвязки агрегатов были установлены приборы контроля температуры, объемной концентрации метана в помещении. Расход истечения метана из технологической обвязки был выбран исходя из наиболее вероятного отверстия в технологической обвязке [20] и величины давления в газовом трубопроводе, согласно расчетам, расход газа из отверстия диаметром 10 мм был принят 40 л/с. Требуемая степень негерметичности обеспечивалась наличием отверстия в стене. Установки подачи ВСМФС для моделируемого помещения исходя из степени негерметичности и объема были

выбраны в количестве 2 в соответствии с рис. 3. Расход установок подачи ВСМФС был задан $5\text{ м}^3/\text{с}$. Начало работы установок ВСМФС начиналась при достижении объемной концентрации метана в размере 0,2 от НКПР. Согласно технической документации на ТЭЦ, прекращение подачи метана не может быть осуществлено сразу после обнаружения утечки в силу технически связанных процессов, минимальное возможное время прекращения подачи 10 мин с момента обнаружения.

Результаты и обсуждение

Рассмотрение результатов моделирования было разделено на два блока:

- анализ процесса распространения метана в объеме машинного зала ТЭЦ;
- описание результатов, снятых детектирующими устройствами.

В первой части рассмотрим поэтапное распространение метана в объеме машинного зала ТЭЦ, при этом временные промежутки развития пожара были выбраны следующим образом:

- на момент достижения максимальной объемной концентрации метана в объеме помещений ТЭЦ, $t = 100\text{ с}$, через 60 с после подачи ВСМФС (рис. 5);
- через 30 с после прекращения выхода метана из отверстия $t = 630\text{ с}$ и на момент полного выхода метана из помещения $t = 700\text{ с}$ (рис. 5).

По результатам анализа процесса распространения метана было установлено, что за 60 с работы двух установок ВСМФС среднеобъемная концентрация метана в помещении снижается, однако его концентрация повышается в пределах объема выхода. То есть подача струй ВСМФС сверху приводит к местному повышению концентрации метана на месте выхода, что может привести к созданию стехиометрических концентраций уже после начала подачи ВСМФС. Это подтверждается показаниями, снятыми с устройства измерения объемной концентрации метана (рис. 6).

Для решения данной проблемы целесообразно подавать ВСМФС с боковой поверхности, для подтверждения данной гипотезы проведем дополнительную серию моделирования при сохранении остальных начальных условий (рис. 7).

Анализ рис. 7 показал, что до момента начала подачи огнетушащего вещества наблюдается быстрый рост концентрации метана в машинном зале, после начала подачи ВСМФС в течение 10 с происходит его резкое снижение до значения 0,04 объема. Дальнейшая подача ВСМФС с боковой поверхности не приводит к росту концентрации метана в объеме помещения и позволяет планомерно удалить газ из машинного зала ТЭЦ.

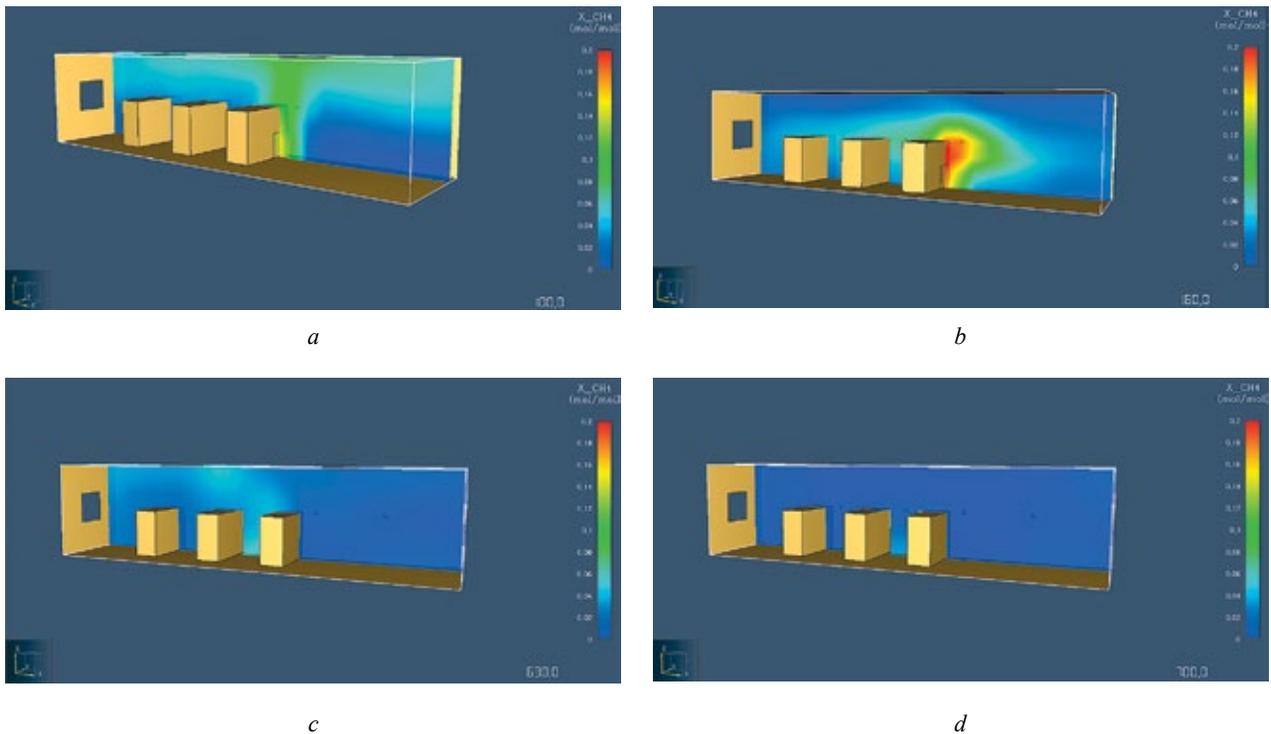


Рис. 5. Объемная концентрация метана в машинном зале: *a* — момент достижения максимальной среднееобъемной концентрации метана при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* — через 60 с после подачи ВСМФС при $t = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$; *c* — через 30 с после прекращения выхода метана из отверстия при $t = 630\text{ }^{\circ}\text{C}$; *d* — момент полного выхода метана из помещения $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Volumetric concentration of methane in the machine room: *a* — the moment of reaching the maximum average volumetric concentration of methane at $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; *b* — 60 s after the supply of AEMPS at $t = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$; *c* — 30 s after the cessation of methane escape from the hole at $t = 630\text{ }^{\circ}\text{C}$; *d* — the moment of complete methane escape from the room at $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

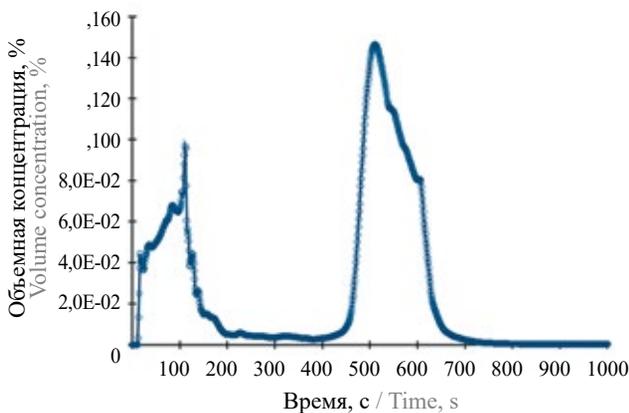


Рис. 6. Зависимость объемной концентрации метана в машинном зале от времени при подаче ВСМФС сверху
Fig. 6. Time dependence of volumetric concentration of methane in the turbine room when the AEMPS is fed from above

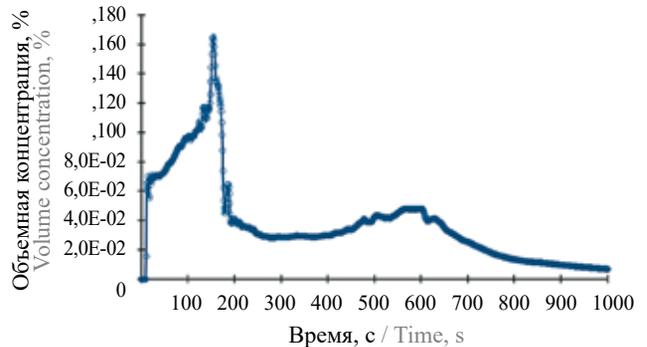


Рис. 7. Зависимость объемной концентрации метана в машинном зале от времени при подаче ВСМФС сбоку
Fig. 7. Time dependence of methane volume concentration in the engine room when AEMPS is fed from the side

Выводы

Анализ существующих средств предотвращения пожаров газов показал, что их применение может про-
воцировать увеличение размеров зон взрывоопасных концентраций. Расчетами установлено, что мини-
мально флегматизирующая концентрация ВСМФС в замкнутом объеме составляет 30,6 %. Моделирова-

нием было установлено, целесообразно устанавливать устройства подачи ВСМФС на боковых поверхно-
стях, а достижение флегматизирующей концентрации наступает в течение 10 сек с момента подачи ВСМФС.
Оптимальные параметры подачи в замкнутый объем для предотвращения пожаров будут достигаться, когда
температура выхода ВСМФС будет не менее 70 °С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Чистяков Т.И., Роечко В.В., Храмов С.П.* К вопросу о ликвидации утечки хлора в Арктической зоне Российской Федерации с применением технологии водной среды в метастабильном фазовом состоянии // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Всемирному дню гражданской обороны. В 5 ч. Ч. 2. г. Москва, 1 марта 2024 г. М. : Академия Государственной противопожарной службы, 2024. С. 104–109. EDN VHREOU.
2. *Роечко В.В., Халиков Р.В.* Пожаровзрывобезопасность замкнутых пространств объектов газокomppressorных станций // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 30–35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35
3. *Азатян В.В.* Особенности физико-химических механизмов и кинетических закономерностей горения, взрыва и детонации газов // Кинетика и катализ. 2020. № 3. Т. 61. С. 291–311. DOI: 10.31857/S0453881120030041 EDN: YMXTTZ
4. *Liu H., Wang F.* Research on N₂-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf // PLoS ONE. 2019. Vol. 14 (9). Pp. 1–21. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
5. *Azatyany V.V., Wagner G.Gg., Vedeshkin G.K.* Suppression of detonations by efficient inhibitors. Gaseous and Heterogeneous Detonations. M. : ENAS Publishers, 1999. Pp. 331–336.
6. *Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S.* Fleming suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type // Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section. 2019. 21 s. DOI: 10.6028/NIST.SP.984.4
7. *Халиков Р.В.* Применение ингибиторов горения для объемного пожаротушения газокomppressorных станций // Роль противопожарных служб в решении нетрадиционных угроз безопасности : мат. I Междунар. науч. конф. Вьетнам : Институт пожарной безопасности МОБ СПб, 2020. С. 1535–1540.
8. *Шмаков А.Г., Коробейничев О.П., Шварцберг В.М., Якимов С.А., Князьков Д.А., Комаров В.Ф., Сакович Г.В.* Исследование фосфорорганических, фторорганических, металлосодержащих соединений и твердо-топливных газогенерирующих составов с добавками фосфорсодержащих соединений в качестве эффективных пламегасителей // Физика горения и взрыва. 2006. № 6. 10 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757038> (дата обращения: 12.05.2024).
9. *Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А., Шварцберг В.М., Куценогий К.П., Марков В.И.* Применение аэрозольной технологии и эффективных нелетучих пламегасителей для тушения различных типов пожаров // Интерэкспо ГЕО-сибирь. 2012. № 3. 10 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (дата обращения: 12.05.2024).
10. *Высокоморная О.В., Марков А.О., Назаров М.Н., Стрижак П.А., Янов С.Р.* Численное исследование влияния условий распыления воды на температуру в следе «Водяного снаряда» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2013. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-vliyaniya-usloviy-raspyleniya-vody-na-temperaturu-v-slede-vodyanogo-snaryada> (дата обращения: 12.05.2024).
11. *Стрижак П.А.* Численный анализ диффузионно-конвективных процессов тепломассопереноса при движении капель воды через высокотемпературные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. № 7. С. 11–21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennyu-analiz-diffuzionno-konvektivnyh-protsessov-teplomassoperenosa-pri-dvizhenii-kapel-vody-cherez-vysokotemperaturnye> (дата обращения: 12.05.2024).
12. *Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* Влияние распределения капель воды в «водяном снаряде» на температуру в его следе // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. № 2. С. 9–17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-kapel-vody-v-vodyanom-snaryade-na-temperaturu-v-ego-slede> (дата обращения: 12.05.2024).
13. *Розенцвайг А.К., Страшинский Ч.С.* Кипение капель низкокипящей дисперсной фазы в режиме гетерогенной нуклеации // Инновационная наука. 2016. № 11-2. С. 56–60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kipenie-kapel-nizkokipyaschey-dispersnoy-fazy-v-rezhime-geterogennoy-nukleatsii> (дата обращения: 12.05.2024).
14. *Хасанов Р.М., Лиштаков А.А., Чистов Ю.С.* Исследование интенсивности теплового излучения в зависимости от очага пожара и площади разлива легко воспламеняющихся жидкостей и горючих веществ // Вестник Казанского технологического университета. 2017. № 16. С. 110–112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-intensivnosti-teplovogo-izlucheniya-v-zavisimosti-ot-ochaga-pozhara-i-ploschadi-rozliva-legko-vosplamenuyuschihysya> (дата обращения: 12.05.2024).
15. *Дахин С.В., Дроздов И.Г., Шматов Д.П.* К определению относительной скорости капли жидкости в потоке газа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. № 5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-otnositelnoy-skorosti-kapli-zhidkosti-v-potoke-gaza> (дата обращения: 12.05.2024).

16. Маркус Е.С., Снегирев А.Ю., Кузнецов Е.А., Танклевский Л.Т., Аракчеев А.В. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2019. № 4. С. 29–41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-rasprostraneniya-plameni-po-diskretnoy-sovokupnosti-goryuchih-materialov> (дата обращения: 12.05.2024).
17. Бородай С.П., Летин А.Н., Шедько С.В. Экспериментальные исследования структуры пламени и его воздействия на ограждающие судовые конструкции // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 2 (392). С. 79–88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-struktury-plameni-i-ego-vozdeystviya-na-ograzhdayuschie-sudovye-konstruktsii> (дата обращения: 12.05.2024).
18. Пузач С.В., Абакумов Е.С. К определению высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. № 2. С. 31–34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-vysoty-plamennoy-zony-pri-diffuzionnom-goreni-izhidkosti-1> (дата обращения: 12.05.2024).
19. Daniel T., Joseph T., Frederick W. Fire dynamic of spill fires Spill Fires. 2000. Pp. 1–36.
20. Огурцов С.Ю., Семичевский С.В. К вопросу необходимости обоснования исходных данных для моделирования процессов горения турбинного масла // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2016. № 2. 5 с.
21. Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Zhdanova A.O., Strizhak P.A. Containment and suppression of compartment fires using specialized liquid compositions // Fire Safety Journal. 2024. Vol. 147. P. 104187. DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104187
22. Liu Y., Wang X., Liu T., Ma J., Li G., Zhao Z. Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist // Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 141. Pp. 344–354. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.043
23. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face // Powder Technology. 2019. Vol. 343. Pp. 754–764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042
24. Chvanov S.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S. The necessary water discharge density to suppress fires in premises // Powder Technology. 2022. Vol. 408. P. 117707. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117707
25. Liu Y., Fu Z., Zheng G., Chen P. Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing // Fire Safety Journal. 2022. Vol. 130. P. 103601. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103601
26. Rohilla M., Saxena A., Dixit P.K., Mishra G., Narang R. Aerosol forming compositions for fire fighting applications : a review // Fire Technology. 2019. Vol. 55. Pp. 2515–2545. DOI: 10.1007/s10694-019-00843-7

REFERENCES

1. Chistyakov T.I., Roenko V.V., Khramtsov S.P. On eliminating chlorine leakage in the arctic zone of the Russian federation using technology of water environment in a meta-stable phase state. *Civil defense on guard of peace and security : Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the World Civil Defense Day defense. In 5 parts, Part 2. Moscow, March 1, 2024.* Moscow, Academy of State Fire Service, 2024; 104-109. EDN VHREOU. (rus).
2. Roenko V.V., Khalikov R.V. Fire and explosion safety of enclosed spaces of gas-compressor stations. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination.* 2020; 1:30-35. DOI: 10.25257/FE.2020.1.30-35 (rus).
3. Azatyan V.V. Features of the physicochemical mechanisms and kinetic laws of combustion, explosion, and detonation of gases. *Kinetics and Catalysis.* 2020; 61(3):291-311. DOI: 10.31857/S0453881120030041 EDN: YMXTTZ (rus).
4. Liu H., Wang F. Research on N₂-inhibitor-water mist fire prevention and extinguishing technology and equipment in coal mine goaf. *PLoS ONE.* 2019; 14(9):1-21. DOI: 10.1371/journal.pone.0222003
5. Azatyan V.V., Wagner G.G., Vedeshkin G.K. Suppression of detonations by efficient inhibitors. *Gaseous and Heterogeneous Detonations.* Moscow, ENAS Publ., 1999; 331-336.
6. Fleming J.W., Williams B.A., Sheinson R.S. Fleming suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type. *Navy Technology Center for Safety and Survivability Combustion Dynamics Section.* 2019; 21. DOI: 10.6028/NIST.SP.984.4
7. Khalikov R.V. The use of flame inhibitors for volumetric fire extinguishing of gas compressor stations. *Proceedings of the I International Scientific conference "The role of fire services in solving non-traditional security threats"*. Vietnam, Institute of Fire Safety, SRV, 2020; 1535-1540. (rus).
8. Shmakov A.G., Korobeinichev O.P., Shvartsberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A., Komarov V.F., Sakovich G.V. Testing organophosphorus, organofluorine, and metal-containing compounds and solid-propellant gas-generating compositions doped with phosphorus-containing additives as effective fire suppressants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves.* 2006; 6:10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16757038> (accessed: 12.05.2024). (rus).
9. Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Chernov A.A., Shvartsberg V.M., Kutsenogiy K.P., Markov V.I. Application of aerosol technology and non-volatile effective fire suppressants for fire-fighting of various types of fires. *Interexpo Geo-Siberia.* 2012; 3:10. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17980207> (accessed: 15.04.2024). (rus).

10. Vysokomornaya O.V., Markov A.O., Nazarov M.N., Strizhak P.A., Yanov S.R. Numerical study of the influence of water atomization conditions on the temperature in the wake of a “Water projectile”. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. Geo Assets Engineering*. 2013; 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-vliyaniya-usloviy-raspyleniya-vody-na-temperaturu-v-slede-vodyanogo-snaryada> (accessed: 12.05.2024). (rus).
11. Strizhak P.A. Numerical analysis of diffusion and convection heat and mass transfer processes at the moving of water drops through high combustion products. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 7:11-21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislenny-analiz-diffuzionno-konvektivnyh-protsessov-teplo-massoperenosa-pri-dvizhenii-kapel-vody-cherez-vysokotemperaturnye> (accessed: 12.05.2024). (rus).
12. Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of water droplets distribution in the “water shell” on temperature in follow movement. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 2:9-17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredeleniya-kapel-vody-v-vodyanom-snaryade-na-temperaturu-v-ego-slede> (accessed: 12.05.2024). (rus).
13. Rosenzweig A.K., Strashinsky Ch.S. Boiling of droplets of low-boiling of dispersed phase in mode of heterogeneous nucleation. *Innovative Science*. 2016; 11-2:56-60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kipenie-kapel-nizkokipyaschey-dispersnoy-fazy-v-rezhime-geterogennoy-nukleatsii> (accessed: 12.05.2024). (rus).
14. Khasanov R.M., Lishtakov A.A., Chistov Yu.S. Study of the intensity of thermal radiation depending on the fire source and the area of filling of highly flammable liquids and combustible substances. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2017; 16:110-112. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-intensivnosti-teplovogo-izlucheniya-v-zavisimosti-ot-ochaga-pozhara-i-ploschadi-rozлива-legko-vosplamenyayuschih-sya> (accessed: 12.05.2024). (rus).
15. Dakhin S.V., Drozdov I.G., Shmatov D.P. K opredeleniyu relative velocity of a liquid drop in a gas flow. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2013; 5-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-otnositelnoy-skorosti-kapli-zhidkosti-v-potoke-gaza> (accessed: 12.05.2024). (rus).
16. Markus E.S., Snegirev A.Yu., Kuznetsov E.A., Tanklevsky L.T., Arakcheev A.V. Simulation of flame spread over discrete fire load. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 4:29-41. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-rasprostraneniya-plameni-po-diskretnoy-sovokupnosti-goryuchih-materialov> (accessed: 12.05.2024). (rus).
17. Borodai S.P., Letin A.N., Shedko S.V. Experimental studies of the structure of the flame and its impact on the enclosing ship structures. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020; 2(392):79-88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnye-issledovaniya-struktury-plameni-i-ego-vozdeystviya-na-ograzhdayuschie-sudovye-konstruktsii> (accessed: 12.05.2024). (rus).
18. Puzach S.V., Abakumov E.S. Definition of flame height zone in case of liquid diffusion combustion. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 2:31-34. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-opredeleniyu-vysoty-plamennoy-zony-pri-diffuzionnom-gorenii-zhidkosti-1> (accessed: 12.05.2024). (rus).
19. Daniel T., Joseph T., Frederick W. *Fire dynamic of spill fires Spill Fires*. 2000; 1-36.
20. Ogurtsov S.Yu., Semichevsky S.V. On the question of the need to substantiate the initial data for modeling the combustion processes of turbine oil. *Naukoviy visnik: Tsivilny zahist ta pozhezhna bezpeka*. 2016; 2:5. (ukr).
21. Kuznetsov G.V., Volkov R.S., Sviridenko A.S., Zhdanova A.O., Strizhak P.A. Containment and suppression of compartment fires using specialized liquid compositions. *Fire Safety Journal*. 2024; 147:104187. DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104187
22. Liu Y., Wang X., Liu T., Ma J., Li G., Zhao Z. Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020; 141:344-354. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.043
23. Yang S., Nie W., Lv S., Liu Z., Peng H., Ma X., Cai P., Xu C. Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face. *Powder Technology*. 2019; 343:754-764. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.042
24. Chvanov S.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S. The necessary water discharge density to suppress fires in premises. *Powder Technology*. 2022; 408:117707. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117707.
25. Liu Y., Fu Z., Zheng G., Chen P. Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103601. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103601.
26. Rohilla M., Saxena A., Dixit P.K., Mishra G., Narang R. Aerosol forming compositions for fire fighting applications : a review. *Fire Technology*. 2019; 55:2515-2545. DOI: 10.1007/s10694-019-00843-7.

Поступила 04.07.2024, после доработки 30.07.2024;

принята к публикации 02.08.2024

Received July 4, 2024; Received in revised form July 30, 2024;

Accepted August 2, 2024

Информация об авторах

ХАЛИКОВ Ринат Валерьевич, старший преподаватель кафедры пожарной техники, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru

РОЕНКО Владимир Васильевич, к.т.н., профессор, профессор кафедры пожарной техники в составе учебно-научного комплекса Пожарной и аварийно-спасательной техники, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 810145; ORCID: 0000-0003-1635-1123; e-mail: piroemail@bk.ru

БЕГИШЕВ Ильдар Рафатович, д.т.н., профессор, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 51507; ORCID: 0000-0001-5619-4025; e-mail: begishev@mail.ru

ХАЛИКОВА Татьяна Николаевна, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина 4; РИНЦ ID: 1168933; ORCID: 0000-0002-7588-7166; e-mail: tatyana.bobyreva7@mail.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, старший преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Rinat V. KHALIKOV, Senior Lecturer, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 1045928; ORCID: 0000-0002-0842-4989; e-mail: vokilah@rambler.ru

Vladimir V. ROENKO, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Engineering as part of the Educational and Scientific Complex of Fire and Rescue Equipment, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 810145; ORCID: 0000-0003-1635-1123; e-mail: piroemail@bk.ru

Ildar R. BEGISHEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 51507; ORCID: 0000-0001-5619-4025; e-mail: begishev@mail.ru

Tatyana N. KHALIKOVA, Student of the Post-Graduate Course, Academy of State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Russian Federation, Boris Galushkin St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RSCI: 1168933; ORCID: 0000-0002-7588-7166; e-mail: tatyana.bobyreva7@mail.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Head of the Testing Sector of the Explosion Safety Research Center of the Institute of Integrated Safety in Construction, Senior Lecturer at the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavl'skoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.