

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 4. С. 65–75
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(4):65-75

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ/REVIEW PAPER

УДК 614.842.615

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.04.65-75>

Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях

Михаил Владимирович Алешков¹, Олег Викторович Двоенко¹,
Андрей Сергеевич Гумиров^{1✉}, Артем Игоревич Соковнин¹,
Максим Вадимович Серегин², Игорь Олегович Семенюк²,
Сергей Георгиевич Цариченко³

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

² Служба пожаротушения Федеральной противопожарной службы Управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, г. Москва, Россия

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. На сегодняшний день пожары в высотных объектах являются одной из существенных проблем, с которой сталкиваются подразделения пожарной охраны. Уникальные объекты требуют специального подхода с точки зрения обеспечения пожарной безопасности и тушения пожара. Важнейшей задачей является обеспечение подачи огнетушащих веществ на высоту с использованием современных пожарно-технических средств и установок. Этому вопросу и посвящен настоящий обзор.

Материалы и методы. Проведение экспериментальных исследований в рамках научно-тактических учений на крыше башни «Neva Towers» с целью оценки возможности подачи огнетушащих веществ различными способами на высоту. Рассматривались следующие способы подачи на высоту: с использованием оборудования контейнера для высотного пожаротушения, от установки с технологией получения компрессионной пены, с помощью установки гидроабразивной резки «Кобра».

Теоретические основы. Разработана методология проведения комплексных экспериментальных исследований возможности развертывания и подачи различных технических средств пожаротушения в высотных зданиях с привлечением штатной группировки сил и средств пожарной охраны г. Москвы.

Результаты и обсуждения. В результате научно-тактических учений была доказана эффективность применения новых установок пожаротушения с подачей компрессионной пены, а также установки с технологией гидроабразивной резки «Кобра». Удалось обеспечить подачу на высоту 345 м.

Выводы. На сегодняшний день с помощью новых технологий пожаротушения экспериментально доказано, что их применение наиболее эффективно по сравнению с «традиционными» методами подачи огнетушащих веществ. В дальнейшем необходимо проведение более детальных исследований гидродинамических параметров насосно-рукавных систем с целью разработки рекомендаций для предварительного планирования действий сил и средств пожарно-спасательных подразделений.

Ключевые слова: компрессионная пена; насосно-рукавная система; подача на высоту; установка пожаротушения с гидроабразивной резкой; мотопомпа

Для цитирования: Алешков М.В., Двоенко О.В., Гумиров А.С., Соковнин А.И., Серегин М.В., Семенюк И.О., Цариченко С.Г. Оценка возможности использования различных средств пожаротушения в высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 65–75. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.65-75

✉ Гумиров Андрей Сергеевич, e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

Assessment of the possibility of using various fire extinguishing means in high-rise buildings

Mikhail V. Aleshkov¹, Oleg V. Dvoenko¹, Andrey S. Gumirov^{1✉}, Artem I. Sokovnin¹,
Maxim V. Seregin², Igor O. Semenyuk², Sergey G. Tsarichenko³

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

² Fire Extinguishing Service of the Federal Fire Service of the Department of Organization of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Moscow, Russian Federation

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To date, fires in high-rise buildings are one of the significant problems faced by fire protection units. Unique objects require a special approach in terms of fire safety and fire extinguishing. The most important task is to ensure the supply of extinguishing agents to the height using modern fire-fighting equipment and installations.

Materials and methods. In September 2021, to conduct experimental scientific and tactical exercises on the roof of the Neva Towers tower, a program and methodology for supplying fire extinguishing agents in various ways to the height were developed. The following methods of feeding to height were considered: deployment using the equipment of a container for high-altitude firefighting, feeding from an installation with compression foam technology, feeding using a waterjet cutting unit "Cobra".

Theoretical bases. A theoretical assessment of the possibility of supplying extinguishing agents to a height with the help of new fire-rescue equipment confirmed the need for experimental scientific and tactical exercises on the roof of the Neva Towers tower.

Results and discussions. As a result of the scientific and tactical exercises, the effectiveness of the use of new fire extinguishing systems with compression foam supply, as well as installations with waterjet cutting technology "Cobra" was proved. It was possible to provide a feed to a height of 350 m.

Conclusions. To date, with the help of new fire extinguishing technologies, it has been experimentally proven that their use is most effective compared to "traditional" methods of supplying extinguishing agents. In the future, it is necessary to conduct more detailed studies of the hydrodynamic parameters of pumping and bag systems in order to develop recommendations for preliminary planning of the actions of forces and means of fire and rescue units.

Keywords: compression foam; pump-bag system; feeding to height; fire extinguishing installation with waterjet cutting; motor pump

For citation: Aleshkov M.V., Dvoenko O.V., Gumirov A.S., Sokovnin A.I., Seregin M.V., Semenyuk I.O., Tsarichenko S.G. Assessment of the possibility of using various fire extinguishing means in high-rise buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):65-75. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.65-75 (rus).

✉ Andrey Sergeevich Gumirov, e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

Введение

Многие города мира сегодня сталкиваются с необходимостью увеличения темпов высотного строительства. Это позволяет решать ряд вопросов социального и экономического характера, предоставлять дополнительные площади в условиях точечной застройки мегаполисов. Однако среди большого количества положительных аспектов высотного строительства возникает существенная проблема обеспечения пожарной безопасности и тушения пожаров на этих объектах [1].

Анализ международной статистики позволяет говорить, что пожары в высотных зданиях в последние годы становятся не редкостью. Среди наиболее крупных и резонансных пожаров можно выделить [2]:

- пожар, произошедший 6 декабря 2004 г. в городе Чикаго в 45-этажном здании Национального Банка. В тушении были задействованы треть личного состава и техники. Погибли более 30 человек;
- пожар в Мадриде 13 февраля 2005 г., где огонь практически полностью уничтожил 32-этажный небоскреб «Виндзор». В ходе тушения пожара пострадали семь огнеборцев;
- сильный пожар в столице Объединенных Арабских Эмиратов 19 октября 2009 г. Загорелась строящаяся высотка в фешенебельном районе «Город Солнца». На месте возгорания работали несколько десятков пожарных автомобилей. Рабочих, которые проводили строительные работы, эвакуировали с помощью вертолетов;

- 2 апреля 2012 г. загорелась башня «Восток» комплекса «Федерация» в деловом центре «Москва-Сити» в российской столице. Огонь распространился на два этажа — 66 и 67-й. Площадь пожара составила 300 м². Огонь ликвидировали силами 20 пожарных расчетов и 4 вертолетов;
- пожар 20 июля 2016 г. в 75-этажном здании небоскреба «Sulafa Tower» в Дубае, где огнем было охвачено больше 20 этажей. Благодаря слаженной работе пожарных и спасательных служб жертв удалось избежать (рис. 1).

Приведенные примеры наглядно демонстрируют всю опасность и сложность процесса спасения людей и тушения пожаров на подобных объектах. Большое количество научно-технических институтов и управлений работают сейчас по разработке новых норм, стандартов и правил в области конструктивных, градостроительных, противопожарных решений [3].

Несмотря на принимаемые нормативно-технические меры, современные системы пожарной автоматики и тушения, по-прежнему основными тактическими единицами борьбы с огнем и эвакуации людей являются личный состав пожарно-спасательных подразделений и мобильные средства пожаротушения.

Для организации работ по тушению высотных зданий необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, происходит предварительное планирование действий пожарно-спасательных подразделений



Рис. 1. Пожары в высотных зданиях: *a* — Мадрид; *b* — Абу-Даби; *c* — Москва; *d* — Дубай

Fig. 1. Fires in high-rise buildings: *a* — Madrid; *b* — Abu Dhabi; *c* — Moscow; *d* — Dubai

по организации тушения пожаров на конкретном объекте. Анализируются возможные способы и пути эвакуации людей, тщательно выбираются маршруты подъезда и установки высотных механизмов.

Во-вторых, проводится анализ тактико-технических возможностей пожарно-спасательной техники гарнизона по подаче огнетушащих веществ на предельно возможную высоту за кратчайший промежуток времени.

Учитывая перечисленные сложности, требуется выработка системного подхода к организации и тактике тушения пожаров в высотных зданиях и разработке и применению мобильных средств пожаротушения. При этом особое внимание необходимо уделять выбору средств пожаротушения, от эффективности применения которых во многом зависит результат успешного пожаротушения. Этой проблеме и посвящен настоящий обзор.

Экспериментальное исследование

В России лидером среди городов с наибольшим количеством высотных зданий является Москва. Особое внимание уделяется комплексу высотных сооружений делового центра «Москва-Сити». Уникальные объекты требуют специального подхода с точки зрения обеспечения пожарной безопасности и тушения пожара. Для отработки системного под-

хода по применению различных способов пожаротушения наряду с теоретическими необходимы результаты практических исследований. С этой целью в сентябре 2021 г. были проведены экспериментальные научно-технические учения в башне «Neva Towers». Основной целью эксперимента являлась оценка возможности подачи огнетушащих составов и определение временных параметров развертывания пожарно-спасательных подразделений на крыше здания высотой в 345 м тремя способами с использованием:

- 1) контейнерного оборудования для высотного пожаротушения;
- 2) компрессионной пены;
- 3) водяного пожаротушения высокого давления с использованием установки гидроабразивной резки «Кобра».

В учениях приняли участие сотрудники и работники ГУ МЧС России по г. Москве, Департамента ГОЧС и ПБ по г. Москве и Академии ГПС МЧС России.

Традиционным способом подачи огнетушащих веществ на высоту является подача в перекачку с использованием переносных пожарных мотопомп [4] (рис. 2).

Особенностью контейнера является наличие в нем передвижных модулей с комплектом пожарных напорных рукавов и мотопомпой. Благодаря своей



a



b

Рис. 2. Пожарный контейнер с пожарным оборудованием

Fig. 2. Fire container with fire equipment

конструкции модули могут быстро перемещаться по твердой поверхности и доставляться на различные этажи с помощью пожарных лифтов, где происходит их дальнейшее развертывание (рис. 3).

Вторым способом обеспечения тушения на высоте является применение компрессионной пены, подаваемой по рукавным линиям, применение которой существенно повышает эффективность пожаротушения, расширяя тактические возможности оперативных подразделений [5].

Основным принципом построения установок получения и подачи компрессионной пены, применяемой для тушения высотных зданий, является то, что образование пены происходит на выходе из насосной установки в результате смешивания сразу трех компонентов: воды, поверхностно-активного вещества (пенообразователя) и воздуха. Воздух под давлением подается в камеру генерации пены от воздушного компрессора или специальных баллонов, после чего уже в готовом виде пена подается в пожарные напорные рукава [6–10].

В результате по рукавам движется газоводяная смесь — готовая пена, плотность которой существенно меньше плотности раствора пенообразователя, применяемого в традиционных пенных системах. Кроме того, реология течения пены по рукавам отличается от потока воды, обладая меньшим гидравлическим сопротивлением. Все это обеспечивает возможность подачи компрессионной пены на большую высоту для тушения высотных пожаров [11]. При этом в случае с компрессионной пеной кратность может регулироваться в широких пределах от 2 до 20 за счет вариации количества воздуха, подаваемого в камеру пеносмешения. Это также обеспечивает возможность управлять режимами подачи пены на различную высоту и выбора кратности пены для тушения пожаров твердых веществ (класс А) и горючих жидкостей (класс В) [11–13]. Для подачи компрессионной пены в очаг пожара используются стволы с простым гладким насадком, что обеспечивает компактную форму струи, обладающей большей кинетической энергией и дальней подачей [14–16].



a



b

Рис. 3. Транспортировка и развертывание мотопомп

Fig. 3. Transportation and deployment of motor pumps

Объектом для экспериментальных исследований возможности подачи на высоту являлась установка получения и подачи компрессионной пены, установленная на пожарной автоцистерне АЦ 3,2-40/4 на базовом шасси КАМАЗ 43253. Развертывание магистральной линии пожарных напорных рукавов диаметром DN65 по маршевой лестнице и подача компрессионной пены представлены на рис. 4.

При проведении испытаний удалось выделить ряд тактико-технических преимуществ применения компрессионной пены при тушении на высоте:

- структура пены при выходе из пожарного ствола имеет однородную структуру, обладающую хорошей адгезионной способностью;
- в компрессионной пене практически отсутствует пенообразователь в остаточной жидкой фазе, что приводит к его экономии;
- возможность подачи на высоту до 350 м по магистральным рукавным линиям;

- возможность свободного маневрирования ствольщика при тушении пожара из-за низкого веса рукавной линии с компрессионной пеной;
- относительно меньшая масса рукавной линии по сравнению с подачей водных растворов пенообразователя.

Третьим способом подачи огнетушащих веществ на крышу башни «Neva Towers» стало использование установки водяного пожаротушения высокого давления гидроабразивной резки «Кобра». При использовании этой системы положительный результат в локализации и тушении очага достигается за счет непосредственного взаимодействия мелких капелек воды с пламенем, в результате чего происходит охлаждение зоны горения с одновременным парообразованием [17, 18]. Применение установки гидроабразивной резки позволяет осуществлять тушение закрытых помещений без их предварительного вскрытия с безопасной позиции с внешней стороны помещения, что обеспечивает снижение влияния опасных факторов пожара на личный состав. Подача



a



b

Рис. 4. *a* — развертывание магистральной линии по лестничным маршам; *b* — подача компрессионной пены на крышу башни «Neva Towers» делового центра «Москва-Сити»

Fig. 4. *a* — the deployment of the main line along the staircases; *b* — the supply of compression foam to the roof of the Neva Towers tower of the Moscow City business center



a



b

Рис. 5. *a* — транспортировка катушки со шлангом высокого давления; *b* — подача огнетушащих веществ с помощью ствола «Кобра»

Fig. 5. *a* — transportation of a coil with a high-pressure hose; *b* — the supply of fire extinguishing agents using the “Cobra” barrel

воды происходит с расходом до 60 л/мин при давлении 300 атм [19, 20].

В ходе проведения эксперимента происходило развертывание рукавной линии высокого давления по лестничным маршам с последующим вскрытием конструкций из металла и дерева и тушением (рис. 5).

Применение установки «Кобра» доказало свою эффективность для подачи огнетушащих средств на высоту.

Результаты и выводы по проведенному эксперименту

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены данные, подтверждающие возможность применения заявленных способов пожаротушения на заданную высоту 345 м.

В ходе проведения эксперимента наиболее быстрым по времени развертывания оказался первый способ перекачки с использованием переносных мотопомп, время развертывания составило 45 мин без подачи огнетушащих веществ, что было обусловлено использованием пожарных лифтов.

Второй и третий способ — с подачей компрессионной пены и использованием установки гидроабразивной резки — обеспечили практически одинаковое время развертывания и подачи огнетушащих веществ, что составило чуть более 60 мин.

Стоит отметить, что, в случае отсутствия возможности использования пожарных лифтов на объекте, развертывание будет происходить по лестничным маршам, и в данном случае второй и третий способы будут более предпочтительными [21].

Для обоснования выбора технических средств, обеспечивающих подачу огнетушащих веществ на высоту, необходимо руководствоваться тремя основными положениями.

1. Технические возможности средств подачи огнетушащих веществ должны быть равны либо превышать требуемую высоту подачи.

2. Реализация функции минимального времени боевого развертывания.

3. Эффективность применения выбранного способа и средства пожаротушения для локализации и ликвидации пожара.

Основное принципиальное положение, которое должно выполняться, — это обеспечение техническими средствами для подачи огнетушащих средств на необходимую высоту. Если не выполняется данное положение, то нет необходимости рассматривать два последующих, а сами технические средства, реализующие способ подачи огнетушащих веществ на высоту, не учитывать.

Второе и третье положение должны рассматриваться как обоснование выбора технических средств, которое позволит реализовать наиболее эффективный способ (с точки зрения сокращения времени развертывания и привлечения личного состава) подачи огнетушащих средств в зону горения. В общем виде эффективность можно записать как реализацию двух функций:

$$\begin{aligned} F(X) &\rightarrow \min, \\ T(X) &\rightarrow \max, \end{aligned} \quad (1)$$

где $F(X)$ — функция времени боевого развертывания, которая зависит от выбора способа подачи огнетушащих средств на высоту; $T(X)$ — функция тактических возможностей по тушению пожара, которая зависит от выбора способа подачи огнетушащих средств на высоту.

Рассматривая первый способ подачи огнетушащих веществ на высоту, обеспечивающийся пожарными мотопомпами, можно сделать вывод, что высота подачи огнетушащих средств физически ограничена только количеством мотопомп, задействованных в организации подачи огнетушащих веществ.

В работе [22] представлены результаты исследований по разработке численной модели оценки продолжительности развертывания сил и средств при тушении пожаров в строящихся высотных зданиях. Используя полученные экспериментальные данные, была выведена эмпирическая зависимость, позволяющая оценить время боевого развертывания при использовании первого способа в условиях, когда мотопомпы необходимо поднимать вручную (лифт выведен из строя):

$$F(X) = 0,0037x^2 + 0,1025x, \quad (2)$$

где x — высота подъема мотопомпы или рукавной линии, м.

Таким образом, в случае отсутствия или не работоспособности пожарных лифтов на объекте защиты расчет затрат времени на реализацию первого способа подачи огнетушащих веществ составит более 5 ч, что говорит о необходимости реализации альтернативных способов подачи огнетушащих веществ.

Второй и третий способ имеют преимущества в сравнении с первым в части боевого развертывания, так как в данном случае прокладывается только рукавная линия до места подачи огнетушащего вещества. Расчетное время боевого развертывания возможно определить по эмпирической зависимости:

$$F(X) = 0,00004x^2 + 0,0892x. \quad (3)$$

Расчетное время прокладки рабочей линии для реализации второго и третьего способа составит 78,4 мин, что на порядок меньше в сравнении с первым способом, но при этом также занимает значительное время. Очевидно, что для обеспечения оперативного развертывания установок пожаротушения с использованием высокого давления и компрессионной пены необходимо предусмотреть оснащение высотных зданий системами сухотрубов, что исключает необходимость прокладки рукавной магистральной линии.

В случае рассмотрения второго и третьего способа возникает вопрос об определении границ возможности подачи огнетушащих веществ на высоту.

В настоящее время не существует расчетной модели, которая описывает движение компрессионной пены по вертикально проложенной рукавной системе, нет количественных гидравлических характеристик данного двухфазного потока. На данный момент существует лишь экспериментальное подтверждение самого факта возможности подачи компрессионной пены на высоту более 345 м, что обуславливает необходимость более глубокого изучения данного вопроса, а именно влияние процесса стратификации и разрушения при вертикальном движении двухфазного потока и определение его гидравлических характеристик.

Оценить границы применения третьего способа подачи огнетушащего вещества возможно на основании результатов, полученных в исследовании [23], где на основе натурных испытаний определены ключевые параметры для расчета насосно-рукавных систем, потеря напора при подаче двухфазного потока в виде смеси воды и абразивных частиц по вертикали, а также коэффициент гидравлического сопротивления. В основе определения предельной возможной высоты лежит условие, что давление на стволе должно быть не менее 22 МПа. Давление на подающем насосе (уровень земли) составляет 30 МПа, таким образом, исходя из постановки задачи допустимые потери на преодоление сопротивления рукавной линии должны составлять менее 8 МПа.

В отличие от моделирования движения однофазной системы (вода), в рассматриваемых двухфазных системах возникают дополнительные потери напора из-за наличия твердой фазы:

$$i_{\text{см}} = i_0 \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_0} + \Delta i, \quad (4)$$

где i_0 — удельные потери напора при движении воды, м; $\rho_{\text{см}}$ — плотность смеси; ρ_0 — плотность воды; Δi — дополнительные потери напора, учитывающие вторую фазу, м.

Дополнительные потери потока, учитывающие вторую фазу (Δi), определяют с помощью следующего выражения:

$$\Delta i = \delta \sqrt{j^3} \sqrt{C_0^2} \frac{V_{\text{кр}}}{V}, \quad (5)$$

где δ — коэффициент, учитывающий влияние относительной крупности частиц по отношению к диаметру трубы d/D ; j — коэффициент разнотерности твердых частиц; C_0 — действительная объемная консистенция, Н/м³; $V_{\text{кр}}$ — критическая скорость движения смеси, при которой частицы начинают двигаться вдоль потока, м/с; V — скорость потока, м/с.

Величина i_0 (4) обуславливает точность оценки значений $i_{\text{см}}$ и зависит от режима движения воды и поверхности труб, которые характеризуются коэффициентом гидравлического трения λ .

В исследовании [24] экспериментальным путем был определен коэффициент гидравлического трения, значение которого составляет 0,019.

Соответственно, зная значение коэффициента гидравлического трения, возможно оценить потери напора по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{т}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}. \quad (6)$$

Таким образом, основываясь на рассмотренных теоретических исследованиях, делаем вывод, что предельная подача огнетушащей смеси с помощью установки гидроабразивной резки «Кобра» составит 290 м по вертикали.

Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности подачи гидроабразивной смеси на высоту 345 м и выполнения операций по вскрытию конструкций и тушению условного пожара. Но так как целью данных исследований являлся факт подачи двухфазной смеси с помощью установки гидроабразивной резки «Кобра» на высоту, то факт полученных различий теоретических и экспериментальных результатов является темой дальнейших исследований по изучению процессов функционирования установок с подачей гидроабразивной смеси, что позволит выполнить верификацию расчетной модели потери давления при течении двухфазового потока, изложенной в работе [25], и сформировать дополнительные методические рекомендации.

Заключение

Подводя итоги, можно утверждать, что современные технологии пожаротушения позволя-

ют обеспечивать тушение пожаров в высотных зданиях. Однако необходимо проведение более детальных исследований технических и гидродинамических характеристик насосно-рукавных систем и средств подачи с целью формирования рекомендаций для предварительного планирования сил и средств. Каждая из рассматриваемых технологий пожаротушения будет иметь свою целесообразность применения, с учетом специфика

ки объекта защиты и тактических действий подразделений реагирования.

Учитывая результаты по расчету необходимого времени на боевое развертывание систем подачи огнетушащих веществ на подобные объекты, целесообразно рассмотреть необходимость монтажа систем сухотрубов для подключения мобильных установок пожаротушения, а также размещение на этажах системы катушек со шлангами высокого давления для транспортировки гидроабразивной смеси.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лазуренко А.А., Николаев А.Н., Шмырева М.Б. Современные проблемы тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 813–816. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091>
2. Казакова В.А., Терещенко А.Г., Недвига Е.С. Пожарная безопасность высотных многофункциональных зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 3(18). С. 38–56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21504585>
3. Подгушный А.В., Денисов А.Н., Хонг Ч.Д. Современные проблемы тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2007. Т. 16. № 6. С. 53–57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091>
4. Малыхин А.В. Пожарные мотопомпы нового поколения // Вестник Восточно-Сибирского института Министерства внутренних дел России. 2013. № 1 (64). С. 59–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23637237>
5. Камлюк А.Н., Навроцкий О.Д., Грачулин А.В. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2017. Т. 1. № 1. С. 44–53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28904246>
6. Алешков М.В. Особенности тушения крупных пожаров на территории Российской Федерации при внешнем воздействии опасных природных явлений // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2013. № 5. С. 59–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19419643>
7. Brinkley J., Depew R. Capabilities and limitations of compressed air foam systems (CAFS) for structural firefighting. Quincy, MA : Fire Protection Research Foundation, 2012. 58 p.
8. Kim A.K., Crampton G.P. Evaluation of the fire suppression effectiveness of manually applied compressed-air-foam (CAF) system // Fire Technology. 2012. Vol. 48. Issue 3. Pp. 549–564. DOI: 10.1007/s10694-009-0119-3
9. Алешков М.В., Ройтман В.М., Воевода С.С., Молчанов В.П., Шарипханов С.Д., Федяев В.Д. Применение компрессионной пены при тушении пожаров в зданиях повышенной этажности // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 3. С. 59–62. DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62
10. Rie D.H., Lee J.W., Kim S. Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios // Applied Sciences. 2016. Vol. 6. Issue 7. P. 191. DOI: 10.3390/app6070191
11. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 44–56. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.04.007
12. Гумиров А.С., Молчанов В.П., Федяев В.Д., Стругов А.О. Исследование параметров массового расхода при подаче по насосно-рукавным системам компрессионной пены // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация. 2020. № 4. С. 5–9. DOI: 10.25257/FE.2020.4.5-10
13. Lee J.-W., Lim W.-S., Rie D.-H. A study on B class fire extinguishing performance of air ratio in the compressed air foam system // Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering. 2013. Vol. 27. Issue 6. Pp. 8–14. DOI: 10.7731/kifse.2013.27.6.008
14. Lee J.-W., Lim W.-S., Kim S.-S., Rie D.-H. A study on fire extinguishing performance evaluation of compressed air foam system // Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering. 2012. Vol. 26. Issue 5. Pp. 73–78. DOI: 10.7731/kifse.2012.26.5.073
15. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for liquid fuel // Procedia Engineering. 2014. Vol. 71. Pp. 44–56. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.007
16. Parikh D. Experimental study of pressure drop and bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system. 2017.
17. US 2010/0126738 A1 [P]. Compressed air foam technology : U.S.A. / T. Kruger, G. Dorau. 02.05.2010.

18. Орехова Н.С. Система безопасности ММДЦ «Москва-Сити» // Пожарная безопасность в строительстве. 2010. № 1. С. 48–51.
19. Камлюк А.Н., Грачулин А.В. Особенности применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2. № 2. С. 168–175. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35017754>
20. Алешков М.В., Гусев И.А. Определение рабочих параметров установок пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки, применяемых на объектах энергетики // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2017. Т. 26. № 10. С. 69–76. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76
21. Алешков М.В., Безбородько М.Д., Гусев И.А. Применение установок пожаротушения с системами гидроабразивной резки на объектах атомной энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 4. С. 7–12. DOI: 10.25257/FE.2016.4.7-12
22. Гордиенко Д.М., Павлов Е.В., Осипов Ю.Н., Ершов В.И., Панфилова Е.В. Проблемы использования компрессионной пены для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности с применением беспилотных авиационных систем // Пожарная безопасность. 2019. № 3 (96). С. 42–46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39707128>
23. Семенов Р.А., Коришунов И.В. Об оценке продолжительности развертывания сил и средств при тушении пожаров в строящихся высотных зданиях // Технологии техносферной безопасности. 2016. № 2 (66). С. 120–127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28795427>
24. Волгина Л.В., Гусев И.А. Экспериментальное исследование потерь напора при движении двухфазного потока в вертикальных трубах // Гидротехническое строительство. 2021. № 11. С. 29–33.
25. Ebrahimi-Mamaghani A., Sotudeh-Gharebagh R., Zarghami R., Mostoufi N. Dynamics of two-phase flow in vertical pipes // Journal of Fluids and Structures. 2019. Vol. 87. Pp. 150–173. DOI: 10.1016/J.JFLUIDSTRUCTS.2019.03.010

REFERENCES

1. Lazurenko A.A., Nikolaev A.N., Shmyreva M.B. Modern problems of extinguishing fires in high-rise buildings and high-rise buildings. *Problems of Ensuring Safety in the Aftermath of Emergencies*. 2018; 1:813-816. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091> (rus).
2. Kazakova V.A., Tereshchenko A.G., Nedviga E.S. The high-rise buildings fire safety. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 3(18):38-56. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21504585> (rus).
3. Podgrushny A.V., Denisov A.N., Hong Ch.D. Modern problems of extinguishing fires in high-rise buildings and high-rise buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2007; 16(6):53-57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12513091> (rus).
4. Malykhin A.V. Fire engine pumps of a new generation. *Vestnik of the East Siberian Institute of the MIA of Russia*. 2013; 1(64):59-70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23637237> (rus).
5. Kamlyuk A.N., Navrotsky O.D., Grachulin A.V. Extinguishing fires with foam generating systems with compressed air. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. 2017; 1(1):44-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28904246> (rus).
6. Aleshkov M.V. Peculiarities of extinguishing large-scale fires on the territory of the Russian federation under the external effect of hazardous natural phenomena. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 5:59-63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19419643> (rus).
7. Brinkley J., Depew R. *Capabilities and limitations of compressed air foam systems (CAFS) for structural firefighting*. Quincy, MA : Fire Protection Research Foundation, 2012; 58.
8. Kim A.K., Crampton G.P. Evaluation of the fire suppression effectiveness of manually applied compressed-air-foam (CAF) system. *Fire Technology*. 2012; 48(3):549-564. DOI: 10.1007/s10694-009-0119-3
9. Aleshkov M.V., Roitman V.M., Voevoda S.S., Molchanov V.P., Sharipkhanov S.D., Fedyaev V.D. The use of compression foam when extinguishing fires in high-rise buildings. *Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*. 2019; 3:59-62. DOI: 10.25257/FE.2019.3.59-62 (rus).
10. Rie D.H., Lee J.W., Kim S. Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*. 2016; 48(3):549-564. DOI: 10.3390/app6070191
11. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for liquid fuel. *Procedia Engineering*. 2014; 71:44-56. DOI: 10.1016/J.PROENG.2014.04.007
12. Gumirov A.S., Molchanov V.P., Fedyaev V.D., Strugov A.O. Analysis of mass flow parameters while delivering compressed air foam through pump-and-hose systems. *Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*. 2020; 4:5-9. DOI: 10.25257/FE.2020.4.5-10 (rus).
13. Lee J.W., Lim W.S., Rie D.H. A study on B class fire extinguishing performance of air ratio in the compressed air foam system. *Fire Science and Engineering*. 2013; 27(6):8-14. DOI: 10.7731/kifse.2013.27.6.008

14. Lee J.-W., Lim W.-S., Kim S.-S., Rie D.-H. A study on fire extinguishing performance evaluation of compressed air foam system. *Fire Science and Engineering*. 2012; 26(5):73-78. DOI: 10.7731/kifse.2012.26.5.073
15. Cheng J., Xu M. Experimental research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for liquid fuel. *Procedia Engineering*. 2014; 71:44-56. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.007
16. Parikh D. *Experimental study of pressure drop and bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system*. 2017.
17. US 2010/0126738 A1 [P]. Compressed air foam technology : U.S.A. Tino Kruger, Gonter Dorau. May 2, 2010.
18. Orekhova N.S. The security system of MMDC "Moscow City". *Fire Safety in Construction*. 2010; 1:48-51. (rus).
19. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. Particularities of extinguishing by compressed air foam systems. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. 2018; 2(2):168-175. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35017754> (rus).
20. Aleshkov M.V., Gusev I.A. Determination of the operating parameters of fire extinguishing installations with waterjet cutting capabilities used at energy facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):69-76. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.69-76 (rus).
21. Aleshkov M.V., Bezborodko M.D., Gusev I.A. The use of fire extinguishing installations with water jet cutting systems at power engineering facilities. *Fires and Emergencies: Prevention, Liquidation*. 2016; 4:7-12. DOI: 10.25257/FE.2016.4.7-12 (rus).
22. Gordienko D.M., Pavlov E.V., Osipov Yu.N., Ershov V.I., Panfilova E.V. Problems of using compression foam to extinguish fires in high-rise buildings with the use of unmanned aircraft systems. *Fire Safety*. 2019; 3(96):42-46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39707128> (rus).
23. Semenov R.A., Korshunov I.V. About assessment of duration of forces and means expansion in case of suppression of the fires in high rise buildings under construction. *Technosphere Safety Technologies*. 2016; 2(66):120-127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28795427> (rus).
24. Volgina L.V., Gusev I.A. Experimental study of pressure losses during the movement of a two-phase flow in vertical pipes. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*. 2021; 11:29-33. (rus).
25. Ebrahimi-Mamaghani A., Sotudeh-Gharebagh R., Zarghami R., Mostoufi N. Dynamics of two-phase flow in vertical pipes. *Journal of Fluids and Structures*. 2019; 87:150-173. DOI: 10.1016/J.JFLUID-STRUCTS.2019.03.010

Поступила 24.01.2022, после доработки 27.06.2022;
принята к публикации 22.07.2022

Received January 24, 2022; Received in revised form June 27, 2022;
Accepted July 22, 2022

Информация об авторах

АЛЕШКОВ Михаил Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника, 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: 766510; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

ДВОЕНКО Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент 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: 772016; ORCID: 0000-0002-0436-4974; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

ГУМИРОВ Андрей Сергеевич, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской

Information about the authors

Mikhail V. ALESHKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 766510; ORCID: 0000-0001-7844-1955; e-mail: aleshkov.m@mail.ru

Oleg V. DVOENKO, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fire Engineering as Part of the Scientific Complex of Fire and Rescue Equipment, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 772016; ORCID: 0000-0002-0436-4974; e-mail: dvoenko_oleg@mail.ru

Andrey S. GUMIROV, Postgraduate Student, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation

обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 1052288; ORCID: 0000-0001-8550-5179; e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

СОКОВНИН Артем Игоревич, канд. техн. наук, доцент кафедры организации деятельности пожарной охраны в составе Учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной 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: 773348; ORCID: 0000-0002-4453-6355; e-mail: SokovninArtem88@yandex.ru

СЕРЕГИН Максим Вадимович, заместитель начальника службы — начальник дежурной смены, Служба пожаротушения Федеральной противопожарной службы Управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Россия, 119034, ул. Пречистенка, 22/2, стр. 1; ORCID: 0000-0002-3793-1736; e-mail: 89652883927@mail.ru

СЕМЕНИЮК Игорь Олегович, помощник начальника дежурной смены, Служба пожаротушения Федеральной противопожарной службы Управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Россия, г. Москва, 119034, ул. Пречистенка, 22/2, стр. 1; ORCID: 0000-0001-6890-2690; e-mail: 89652883927@mail.ru

ЦАРИЧЕНКО Сергей Георгиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

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

ration; ID RISC: 1052288; ORCID: 0000-0001-8550-5179; e-mail: romb55cool2014@yandex.ru

Artem I. SOKOVNIN, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Organization of Fire Protection Activities as Part of Scientific Complex of Fire Safety Systems, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 773348; ORCID: 0000-0002-4453-6355; e-mail: SokovninArtem88@yandex.ru

Maxim V. SEREGIN, Deputy Head of the Service — Head of the Duty Shift, Fire Extinguishing Service of the Federal Fire Service of the Department of Organization of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Prechistenka St., 22/2, bldg. 1, Moscow, 119034, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3793-1736; e-mail: 89652883927@mail.ru

Igor O. SEMENYUK, Assistant to the Head of the Duty Shift, Fire Extinguishing Service of the Federal Fire Service of the Department of Organization of Fire Extinguishing and Emergency Rescue Operations, Prechistenka St., 22/2, bldg. 1, Moscow, 119034, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6890-2690; e-mail: 89652883927@mail.ru

Sergey G. TSARICHENKO, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 181475; ORCID: 0000-0002-9807-6841; e-mail: tsarichenko_s@mail.ru

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