

Проблемы использования беспилотных авиационных систем для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности

© Д. М. Гордиенко, В. И. Логинов[✉], Ю. Н. Осипов,
В. И. Ершов, Е. Д. Михайлова

Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны
МЧС России (Россия, 143903, г. Балашиха Московской обл., мкр. ВНИИПО, 12)

РЕЗЮМЕ

Введение. Целью исследования является демонстрация проблем, которые следует решить при реализации идей пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием беспилотных авиационных систем (БАС). Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: оценка возможностей по подаче воды и водных огнетушащих растворов в очаг пожара от наземной насосной станции по рукавной линии; анализ движения компрессионной пены по вертикально расположенной рукавной линии; оценка возможностей по использованию беспилотных авиационных систем для подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей.

Аналитическая часть. В ходе исследования рассмотрены варианты пожаротушения при непрерывной подаче в очаг пожара воды или водного огнетушащего раствора от наземной насосной станции по рукавной линии, поддерживаемой беспилотным воздушным судном (БВС); при аналогичной подаче в очаг пожара компрессионной пены; при подаче в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей, запасы которых располагаются на БВС.

Заключение. Результаты исследования показывают, что одним из путей повышения возможностей по тушению пожаров в зданиях повышенной этажности может стать использование БАС для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара водного раствора или компрессионной пены, а также подачи огнетушащих порошков и аэрозолей с помощью порошковых пожарных стволов и пиротехнических патронов. Однако реализация каждого из указанных способов связана с необходимостью решения определенных проблем, основными из которых являются: ограниченность возможностей по высоте пожаротушения водными растворами и большая при этом потребная грузоподъемность БВС; необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований в целях построения методики гидравлического расчета систем подачи компрессионной пены; потребность поиска путей обеспечения безопасности применения БАС в условиях расслоения компрессионной пены на газообразную и водную составляющие; неопределенность возможностей по созданию бортовых установок подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей.

Ключевые слова: огнетушащий водный раствор; компрессионная пена; горизонтальная подача; рукавная линия; огнетушащий порошок; огнетушащий аэрозоль.

Для цитирования: Гордиенко Д. М., Логинов В. И., Осипов Ю. Н., Ершов В. И., Михайлова Е. Д. Проблемы использования беспилотных авиационных систем для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2019. — Т. 28, № 4. — С. 82–91. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.82-91.

✉ Логинов Владимир Иванович, e-mail: vniipo_robot@mail.ru

On unmanned aircraft systems application for fire extinguishing in high-rise buildings

© Denis M. Gordienko, Vladimir I. Loginov[✉], Yuri N. Osipov,
Vladimir I. Ershov, Elena D. Mikhaylova

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia
(VNIIPPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the study is to formulate and analyze problems that should be solved before implementing the ideas of fire fighting in high-rise buildings by using unmanned aircraft systems (UAS). To achieve this purpose, the following concepts were considered and assessed: the possibilities of water and water-based fire-extinguishing solutions delivery to the fire source from a ground pumping station using a hose line; delivering compression foam along a vertically positioned hose line; and, the possibilities of UAS for fire extinguishing; supply of fire extinguishing powders and aerosols placed on the UAS to the center of fire.

Methods. The adopted in Russia hydraulic calculation methods, the results of the experimental studies on the compression foam, the existing theoretical and practical advances in the field of fire-extinguishing by jet delivering fire-extinguishing substances.

Conclusions. The results achieved show that one of the ways to increase fire extinguishing capability in high-rise buildings can be provided by applying UAS for continuous horizontal supply of water based solution or compression foam to the center of fire, as well as supply of fire extinguishing powders and aerosols using powder fire barrels and pyrotechnic cartridges. However, to implement each of these methods, certain problems need to be solved. They are: the fire extinguishing height limitations a large capacity of UAS needed; a hydraulic calculation methodology for compression foam supply systems; safe use of UAS under the conditions of compression foam separation; the possibilities for developing supply equipment, which can be utilized by the UAS.

Keywords: fire-extinguishing aqueous solution; compression foam; horizontal feed; hose line; fire-extinguishing powder; fire-extinguishing aerosol.

For citation: D. M. Gordienko, V. I. Loginov, Yu. N. Osipov, V. I. Ershov, E. D. Mikhaylova. On unmanned aircraft systems application for fire extinguishing in high-rise buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 82–91 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2019.28.04.82-91.

✉ Vladimir Ivanovich Loginov, e-mail: vniipo robote@mail.ru

Введение

Технологии применения беспилотных авиационных систем (БАС) получают все большее развитие в спасательных службах многих стран. В основном эти технологии внедряются для управления в кризисных ситуациях, выполнения контрольных функций [1, 2] и обеспечения аварийно-спасательных работ (мониторинга, контроля технического состояния объектов, их безопасности и функционирования, а также разведки очага пожара, транспортировки огнетушащих средств к очагу возгорания и т. д.). В последнее время появляются проекты по внедрению технологий применения БАС непосредственно для тушения пожаров, в том числе в зданиях повышенной этажности.

Попытки реализовать идею пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС предпринимались в нескольких проектах, к которым следует отнести:

- проекты подачи воды в очаг пожара от наземного источника (конструкторское бюро “Искатель” Московского авиационного института, компания Aerones (Латвия), фирма Matrix UAV (Украина), фирма Kamap Aircraft (беспилотник K-Max) (США);
- проект подачи в очаг пожара огнетушащего порошка (Китай).

Однако до полной практической завершенности эти проекты пока не доведены. По мнению авторов статьи, причина кроется в том, что не найдены приемлемые решения некоторых возникших при этом проблем, характерных для используемых в проектах огнетушащих веществ (ОТВ).

Цель исследований — показ проблем, которые следует решить при реализации идей пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: оценка возможностей по подаче

воды и водных огнетушащих растворов в очаг пожара от наземной насосной станции по рукавной линии; анализ движения компрессионной пены по вертикально расположенной рукавной линии; оценка возможностей по использованию беспилотных авиационных систем для подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей.

Анализ современного состояния пожарных технологий и разработок в области создания нового пожарного оборудования и беспилотных воздушных судов (БВС), способных размещать его на борту, показывает, что в настоящее время имеет смысл рассматривать следующие варианты пожаротушения:

- 1) непрерывная подача в очаг пожара воды или водного огнетушащего раствора от наземной насосной станции по рукавной линии, поддерживаемой БВС;
- 2) аналогичная подача в очаг пожара компрессионной пены;
- 3) подача в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей, запасы которых находятся на борту БВС.

Аналитическая часть

Использование БАС для непрерывной подачи в очаг пожара воды и водных растворов

Замысел тушения пожара подачей ОТВ в очаг от наземного источника по рукавной линии заключается в непрерывной, не ограниченной по времени подаче огнетушащего вещества и электропитания от наземных источников по линиям, поддерживаемым с использованием БВС.

Претворение в жизнь данного замысла связано с реализацией схемы, согласно которой к привязной БАС подсоединяется пожарный рукав и через специальный пожарный ствол, расположенный на БВС, при условии точного наведения струи воды на очаг горения строго под нужным углом обеспечивается

тушение огня в самых труднодоступных местах, куда не могут дотянуться лестницы пожарных машин. Управление БАС осуществляется наземным оператором с помощью пульта. Электропитание для БВС подается от наземной станции, что позволяет уменьшить вес аппарата и увеличить его грузоподъемность.

В состав БАС должны входить:

- БВС вертикального взлета и посадки с требуемыми характеристиками;
- комплекты целевой нагрузки по назначению;
- наземная станция управления.

Целевая нагрузка должна включать:

- а) оборудование пожаротушения:
 - съемное оборудование для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара огнетушащего состава из наземной цистерны или другого источника воды с использованием наземной насосной станции;
 - другое съемное оборудование пожаротушения, которым при необходимости можно заменить оборудование для непрерывной горизонтальной подачи огнетушащего водного состава;
- б) систему передачи видеоизображения и телеметрии в реальном времени и в режиме объективного контроля (для послепожарной обработки информации);
- в) тепловизионную камеру для ведения наблюдения в условиях низкой освещенности и для выявления очагов возгорания.

Основой для формирования требований к рассматриваемому комплексу являются характеристики оборудования для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара огнетушащего водного раствора как целевой нагрузки по основному назначению.

Съемное оборудование для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара огнетушащего состава из наземной цистерны или другого источника воды с использованием наземной насосной станции должно включать:

- напорные пожарные рукава усиленной конструкции с соединительными головками повышенной прочности, выдерживающие напор воды, соответствующий максимальной высоте пожаротушения;
- сменные комплекты пожарных стволов и насадков, обеспечивающие оптимальный выбор последних для конкретной ситуации;
- специальную штангу для размещения в ней пожарного ствола для выноса его выходной кромки за пределы площади, ометаемой несущими винтами БВС;
- стальной трос с оборудованием для крепления на нем каждого пожарного рукава, составля-

ющего рукавную линию, а также кабеля для подачи электроэнергии и передачи сигналов управления.

Оборудование должно состоять из стандартных элементов, обеспечивающих наиболее приемлемое сочетание возможностей по высоте пожаротушения, массе груза, поднимаемого БВС, и производительности системы подачи огнетушащего раствора (воды), определяемой секундным объемным расходом.

В таблице приведены характеристики рассматриваемой системы подачи воды, рассчитанные с использованием методики, представленной в [3, 4], с учетом развития водяного пожаротушения [5, 6].

Расчеты проведены для различных вариантов полезной нагрузки с учетом следующего:

- избыточный напор воды, создаваемый наземной насосной станцией, должен соответствовать прочности рукавной линии и, таким образом, не превышать значение 300 м вод. ст., установленное для существующих усиленных пожарных рукавов;
- должна быть обеспечена наименьшая потребная грузоподъемность БВС, для чего рассматриваются рукавные линии с небольшими внутренними диаметрами.

Значения внутреннего диаметра положены в основу вариантов полезной нагрузки, подвешиваемой к аппарату:

- вариант 1: рукавная линия диаметром 25 мм (масса 1 м линии с водой — 0,661 кг), трос диаметром 5 мм для подвески рукавов (масса 1 м — 0,087 кг, грузоподъемность — 300 кг), кабель для подачи электроэнергии и передачи команд управления (масса 1 м — 0,011 кг);
- вариант 2: рукавная линия диаметром 38 мм (масса 1 м линии с водой — 1,394 кг), трос диаметром 7 мм для подвески рукавов (масса 1 м — 0,171 кг, грузоподъемность — 588 кг), кабель для подачи электроэнергии и передачи команд управления;
- вариант 3: рукавная линия диаметром 51 мм (масса 1 м линии с водой — 2,393 кг), трос диаметром 9 мм для подвески рукавов (масса 1 м — 0,282 кг, грузоподъемность — 970 кг), кабель подачи электроэнергии и передачи команд управления.

Анализ данных таблицы показывает, что при реализации горизонтального пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС могут возникнуть проблемы, связанные с недоступностью очагов горения, находящихся на высоте более 280–290 м, и большой потребной грузоподъемностью БВС.

Так, нормальный рабочий избыточный напор воды перед пожарными стволами типа РС-50 и РС-70

Характеристики системы подачи воды от наземной насосной станции в очаг пожара с использованием БАС (пожарные стволы типа РС-50/РС-70)

Characteristics of the water supply system from the ground pumping station to the fire with the use of UAS (fire trunks type RS-50/RS-70)

Режим подачи воды Water supply mode	Сравниваемые характеристики Compared characteristics	Вариант подвешиваемой полезной нагрузки (внутренний диаметр рукавной линии, мм) Suspended payload option (inner diameter of the sleeve line, mm)		
		1 (25)	2 (38)	3 (51)
Рабочий напор перед стволом 40 м вод. ст., длина струи 28–32 м Working head in front of the barrel of 40 m of water column, the length of the jet 28–32 m	Напор перед пожарным стволом, м вод. ст. Pressure in front of the fire barrel, m of water column	40	40	40
	Реакция струи, Н / Jet reaction, N	103,9/222,5	103,9/222,5	103,9/222,5
	Расход воды, л/с / Water consumption, l/sec	3,60/7,40	3,60/7,40	3,60/7,40
	Ожидаемое время тушения пожара в помещении офиса площадью 25 м ² , с The expected time of fire extinguishing in the office area of 25 m ² , sec	250/122	250/122	250/122
	Максимальная высота пожаротушения, м The maximum height of the sprinkler, m	158/70	218/143	240/192
	Масса подвешиваемой полезной нагрузки, кг The mass of the suspended payload, kg	118/52	341/224	642/514
Напор перед стволом, обеспечивающий длину струи ~5 м Pressure in front of the barrel, providing the length of the jet of ~5 m	Напор перед пожарным стволом, м вод. ст. Pressure in front of the fire barrel, m of water column	3,9/3,8	3,9/3,8	3,9/3,8
	Реакция струи, Н / Jet reaction, N	10,2/21,1	10,2/21,1	10,2/21,1
	Расход воды, л/с / Water consumption, l/sec	1,12/2,28	1,12/2,28	1,12/2,28
	Ожидаемое время тушения пожара в помещении офиса площадью 25 м ² , с The expected time of fire extinguishing in the office area of 25 m ² , sec	804/395	804/395	804/395
	Максимальная высота пожаротушения, м The maximum height of the sprinkler, m	279/235	290/275	294/287
	Масса подвешиваемой полезной нагрузки, кг The mass of the suspended payload, kg	209/176	454/430	786/768

Примечание. Над чертой приведены данные для РС-50, под чертой — для РС-70.

Note. Above the line are data for the RS-50, below the line — for the RS-70.

составляет 40 м вод. ст., что обеспечивает определенные, указанные в таблице, расход воды и ожидаемое время тушения пожара (в рассматриваем примере — в помещении офиса площадью 25 м²). При этом пожаротушение можно осуществлять с расстояния 28–32 м, определяемого длиной сплошной струи, создаваемой пожарным стволом. Однако эти характеристики могут быть обеспечены лишь при некоторой высоте пожаротушения (158–240 м для РС-50, 70–192 м для РС-70), а ее превышение приводит к падению избыточного напора и ухудшению остальных параметров. При увеличении высоты пожаротушения для РС-50 / РС-70 до значений 279–294 / 235–287 м, при которых длина сплошной струи уменьшается до величины, безопасной для применения БАС (принимаемой равной 5 м), напор воды перед стволом и расход воды в системе уменьшаются. При этом ожидаемое время тушения пожара увеличивается приблизительно в 3 раза.

Изменение варианта подвешиваемой к БВС полезной нагрузки в сторону увеличения диаметра рукавной линии, в свою очередь, приводит к росту как максимальной высоты пожаротушения, так и массы полезной нагрузки, т. е. параметров, желаемые тенденции к изменению которых являются противоположными. В связи с этим дополнительно возникает проблема выбора рационального варианта оснащения БАС оборудованием для тушения пожаров. Ее решение зависит от ожидаемых условий и должно осуществляться с использованием методов многокритериальной оценки [7].

Использование БАС для непрерывной подачи в очаг пожара компрессионной пены

Одним из способов повысить возможности по горизонтальному тушению пожаров в зданиях повышенной этажности с использованием БАС может быть применение в качестве ОТВ компрессионной

пены, подавать которую в очаг пожара предусматривается от наземного источника по рукавной линии. Этому способствует ряд ее свойств, использовать которые в последнее время предлагается в инженерных и научных кругах как в России и Белоруссии [8–13], так и на Западе [14–16].

Основным свойством компрессионной пены, способствующим повышению возможностей БАС по рассматриваемому виду пожаротушения, является ее легкость. В зависимости от кратности компрессионная пена в 10–60 раз легче воды и огнетушащих водных растворов [8], а масса рукавной линии, заполненной этой пеной, более чем в 2 раза меньше массы рукавной линии, заполненной водой [9, 14]. В связи с этим можно ожидать, что желаемая высота пожаротушения 400 м и более будет достигнута даже при меньшей грузоподъемности БВС.

При этом, как показывают исследования [8, 14], использование компрессионной пены обеспечит такие важные для применения БАС дополнительные преимущества перед водными растворами, как:

- экономия воды (до 7 раз) и пенообразователя (ПО);
- меньший требуемый напор перед пожарным стволом (20–30 м вод. ст. по сравнению с 80 м вод. ст. для установок типа “Пурга”);
- меньшая сила реакции пожарного ствола;
- большая дальность действия струи при одинаковом расходе огнетушащего состава.

Кроме того, “сухая” компрессионная пена хорошо прилипает к вертикальным поверхностям, создавая слой, защищающий объект от распространения огня и теплового излучения очага пожара. Вода же и пена, образуемые в пожарном стволе при подаче водных растворов, обладают большей подвижностью и более высокой способностью к стеканию на нижнюю поверхность объекта пожаротушения.

Однако, наряду с перечисленными положительными свойствами, существуют и факторы, которые создают проблемы, мешающие использованию компрессионной пены при тушении пожаров в высотных зданиях с применением БАС. Основной из таких проблем является недостаточная изученность взаимосвязи параметров состояния и движения компрессионной пены в системе, включающей установку для получения газонаполненной пены (УГНП), рукавную линию и пожарный ствол, что требует проведения дальнейших экспериментальных исследований. Наиболее широко представленные в открытых научных источниках результаты исследований по рассматриваемой тематике, проведенных в МЧС Республики Беларусь, показывают, что вид зависимости удельных потерь давления от объемного расхода воды и ПО существенно отличается от аналогичной зависимости при движении воды [9–11].

В связи с этим использовать существующие методики гидравлического расчета рукавных линий в случае применения компрессионной пены нельзя. Для того чтобы это стало возможно, требуется провести дополнительные целенаправленные экспериментальные исследования, результатом которых должна быть разработка методики гидравлического расчета систем как горизонтальной, так и вертикальной подачи компрессионной пены.

В целях наглядности демонстрации отличий между динамикой потоков водного раствора и компрессионной пены на рис. 1 и 2 представлены зависимости напора воды, а также смеси воды и ПО от их объемных расходов и высоты пожаротушения при использовании рукавных линий диаметром 51 мм и пожарных стволов с насадком диаметром 24 мм. Первая зависимость построена для упрощенной схе-

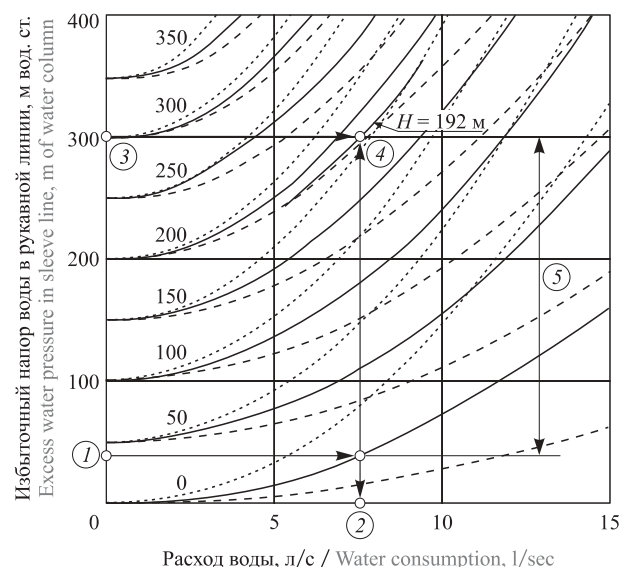


Рис. 1. Зависимость избыточного напора воды от ее расхода и высоты пожаротушения (значения у кривых, м) при использовании рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм и пожарного ствола типа РС-70 с диаметром насадка 16 мм (.....); 19 мм (—) и 24 мм (— —); схема взаимосвязи между параметрами системы подачи воды с насадком диаметром 19 мм: 1 — рабочий напор воды перед пожарным стволом (40 м вод. ст.); 2 — потребный расход воды в системе ее подачи (7,4 л/с); 3 — располагаемый напор воды, создаваемый насосной станцией (300 м вод. ст.); 4 — максимальная высота пожаротушения (192 м — интерполяция между кривыми графика); 5 — потери напора в рукавной линии

Fig. 1. Dependence of excess water pressure on its flow rate and fire-fighting height when using a sleeve line with an internal diameter of 51 mm and a fire trunk of the RS-70 type nozzle diameter 16 mm (.....); 19 mm (—) and 24 mm (— —); scheme of the relationship between the parameters of the water supply system with a nozzle diameter of 19 mm: 1 — working water pressure in front of the fire barrel (40 m of water column); 2 — consumption of water in the system of its supply (7.4 l/sec); 3 — the available water pressure created by the pumping station (300 m of water column); 4 — the maximum height of the fire (192 m — interpolation between the curves of the graph); 5 — loss of pressure in the sleeve line

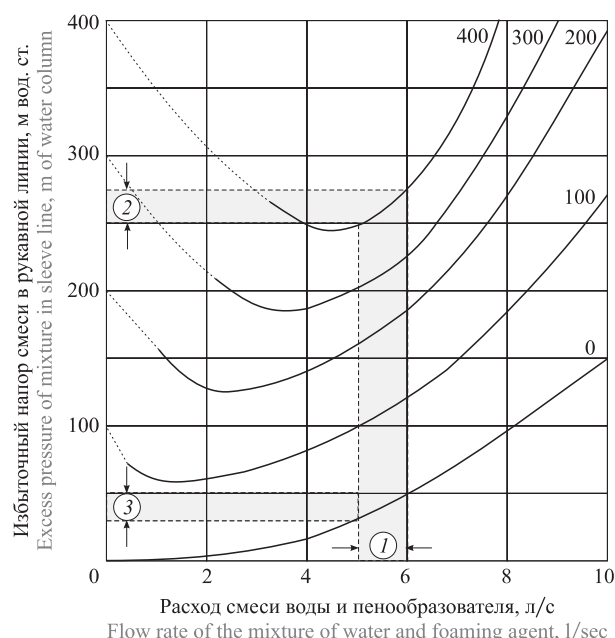


Рис. 2. Вероятный вид зависимости избыточного напора смеси в рукавной линии от объемного расхода воды и ПО и высоты пожаротушения (значения у кривых, м) компрессионной пеной кратностью 8 с использованием рукавной линии диаметром 51 мм и пожарного ствола с насадком диаметром 24 мм: 1, 2, 3 — рабочие диапазоны соответственно расхода воды и ПО, избыточного напора компрессионной пены, создаваемого УГНП, и напора перед пожарным стволом при пожаротушении на высоте 400 м

Fig. 2. The probable type of dependence of the excess pressure of the mixture in the sleeve line on the volume flow of water and foaming agent and the height of the fire extinguishing compression foam multiplicity 8 using a sleeve line with a diameter of 51 mm and a fire barrel with a nozzle diameter of 24 mm: 1, 2, 3 — operating ranges, respectively, the flow rate of the mixture of water and foaming agent, the excess pressure of the compression foam generated by the installation for production of gas-filled foam, and the pressure in front of the fire barrel during fire fighting at an altitude of 400 m

мы подачи воды в соответствии с существующей методикой гидравлического расчета, вторая — приближенно в соответствии с информацией, представленной в [12]. На рис. 1 в графическом виде показан алгоритм оценки параметров системы подачи воды. Этот же алгоритм справедлив и для оценки параметров системы подачи компрессионной пены, в которой потери напора на преодоление веса столба пены определяются с учетом ее реальной плотности. На рис. 1 потери напора в рукавной линии составляют: $300 - 40 = 260$ м вод. ст., из них потери напора на преодоление веса столба воды высотой, равной высоте пожаротушения, — 192 м вод. ст., потери на преодоление гидравлического сопротивления — $260 - 192 = 68$ м вод. ст.

Одним из различий между зависимостями, представленными на рис. 1 и 2, является то, что гидравлические потери напора в рукавной линии и пожарном стволе при движении компрессионной пены

выше, чем при движении воды, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, представленными в [10]. Суммарное же проявление гидравлического сопротивления и веса столба компрессионной пены в рукавной линии таково, что пожаротушение может быть обеспечено на высоте 400 м и более. При этом масса рукавной линии диаметром 51 мм, длиной 400 м с компрессионной пеной кратностью 8 и с тросом поддержки составляет 375 кг, а это примерно в 2 раза меньше, чем масса такой же линии (768–786 кг) длиной около 300 м при использовании воды.

Основное же различие между рассматриваемыми зависимостями заключается в следующем. Зависимость напора воды от ее расхода является квадратичной с минимумом при нулевом расходе (это характерно для несжимаемых жидкостей). Для напора же компрессионной пены зависимость несколько отличается от квадратичной, но также имеет выраженный минимум, который проявляется при отличном от нуля расходе воды и ПО, а по мере роста высоты пожаротушения сдвигается в сторону увеличения расхода. Это объясняется возрастанием газосодержания потока при движении компрессионной пены по рукавной линии и изменением параметров газожидкостного потока (скорость, плотность). При небольших расходах воды и ПО изменение параметров потока вызывает интенсивное расслоение его на газообразную и водную составляющие в пределах рукавной линии, что в конечном счете приводит к заполнению ее водным раствором и повышению напора за УГНП. Поэтому общая тенденция растущей зависимости нарушается, и при некотором значении расхода смеси создается минимум напора. При увеличении же высоты пожаротушения увеличивается длина рукавной линии, и заполнение ее водным раствором, вероятно, происходит даже при больших расходах воды и ПО, что проявляется в смещении минимума в сторону увеличения расхода.

Рассмотренное явление способствует тому, что для каждой высоты пожаротушения компрессионной пеной устанавливаются свои взаимосвязанные рабочие диапазоны расхода воды и ПО, напора перед пожарным стволом и напора, создаваемого УГНП, с верхними и нижними пределами. Верхний предел рабочего диапазона определяется возможностями пожарной техники и оборудования: УГНП — по созданию расхода или избыточного напора воды и ПО при заданной кратности пены; рукавной линии и пожарного ствола — по допустимому избыточному напору. На нижний предел рабочего диапазона влияет процесс расслоения потока компрессионной пены. Выход параметров системы подачи смеси за этот предел приведет к заполнению рукавной линии раствором воды и ПО, возникновению противоавле-

ния столба жидкости и, как следствие, к переходу автоматики подачи пены в аварийный режим, в результате чего подача компрессионной пены прекратится [12]. В ходе экспериментов, результаты которых представлены в [12], рукавная линия не выдерживала веса находящегося в ней раствора воды и ПО, и происходил обрыв пожарного рукава в месте крепления соединительной головки.

Явление возможного заполнения рукавной линии раствором воды и ПО необходимо учитывать при планировании мероприятий по обеспечению безопасности применения БАС. Упущения в данном вопросе могут привести к тому, что БВС в критических ситуациях не сможет удержать конструкцию линии подачи пены, что может привести к катастрофическим последствиям. Данная ситуация может возникнуть как в случае ошибок в выдерживании режима подачи пены, так и при временном прекращении процесса пожаротушения. По данным исследований [9, 12] закрытие ствола более чем на 1 мин приводит к образованию в рукавной линии воздушной пробки, стеканию жидкой фазы в нижнюю часть вертикальной рукавной линии и подъему газовой фазы. При последующем открытии ствола через него из рукавной линии первоначально выходил воздух, что сопровождалось сильными рывками ствола. При пожаротушении на высоте около 100 м поток нормализовался через 1–2 мин, и в системе восстановилась подача компрессионной пены.

Из представленных на рис. 2 данных следует, что пожаротушение компрессионной пеной кратностью 8 в высотном здании с использованием БВС может быть обеспечено на высоте 400 м при расходе воды и ПО 5–6 л/с, при избыточном напоре, создаваемом УГНП, 250–275 м вод. ст. и напоре перед пожарным стволом 30–50 м вод. ст. Однако следует иметь в виду, что значения указанных параметров являются приблизительными, а о точных можно судить только после проведения специальных экспериментальных исследований.

Если в реальных условиях тушение пожара на данной высоте не обеспечивается, то проблема может быть решена путем увеличения кратности пены. Так, по данным исследования [13] повышение кратности компрессионной пены с 8 до 20 обеспечивает снижение потерь избыточного напора в рукавной линии диаметром 51 мм в 2 раза. Для рукавной линии большего диаметра степень снижения потерь напора выше. Так, потери напора в рукавной линии диаметром 66 мм снижаются в 3 раза.

Кроме того, при разработке БАС необходимо учитывать, что постоянно протекающий процесс изменения параметров газожидкостного потока сопровождается некоторой тряской рукавной линии, что может повлиять на устойчивость и управляемость БВС.

Использование БАС для подачи в очаг пожара огнетушащих порошков и аэрозолей

Другим способом расширения возможностей по тушению пожаров в зданиях повышенной этажности с использованием БАС может быть применение огнетушащих порошков и аэрозолей.

Тушение пожаров огнетушащими порошками в настоящее время обычно осуществляется путем их подачи:

- через насадки, расположенные непосредственно в защищаемых помещениях;
- в виде струй, создаваемых порошковыми пожарными стволами;
- с использованием взрывчатых веществ;
- с реализацией вихрепорошкового способа тушения горящего нефтяного или газового фонтана.

Естественно, для внешнего пожаротушения в зданиях повышенной этажности с использованием БАС приемлемыми являются второй и третий способы подачи порошков.

При реализации струйного варианта пожаротушения для формирования и направления струи в очаг пожара используются специальные порошковые пожарные стволы. При этом, кроме ствола, полезная нагрузка БВС должна включать сосуд для хранения огнетушащего порошка, баллоны с газом или компрессорную установку в составе пожарно-технического оборудования. К настоящему времени данный вариант пожаротушения теоретически обоснован [17, 18] и нашел применение при использовании специальных пожарных автомобилей. Определение же возможностей по созданию аналогичного оборудования для размещения на борту БВС пока затруднительно.

Наиболее доступный способ применения порошковой системы с взрывчатыми веществами с беспилотной платформы может быть основан на пуске и подрыве специального пиротехнического патрона, аналогичного модулю порошкового пожаротушения ручного пуска типа МПП (Н-Р)-5-И-ГЭ-У2. Пиротехнический патрон должен состоять из металлического корпуса, в котором размещаются огнетушащий порошок, газогенерирующий и пусковой элементы. Сопловое отверстие для выхода огнетушащего порошка должно быть перекрыто мембраной. При попадании патрона в очаг пожара газогенерирующий элемент вырабатывает газ, огнетушащий порошок вспушивается и внутри патрона создается избыточное давление, необходимое для вскрытия запорной мембраны. После этого огнетушащий порошок выбрасывается через щелевое отверстие в зону горения. Выброс порошка должен происходить менее чем за 1 с, что позволит сбить пламя динамической ударной волной. Кроме того, огнетушащий порошок перекрывает доступ кислорода к горящим материалам (веществам) и гасит огонь.

Аэрозольное пожаротушение зачастую рассматривается как вид порошкового пожаротушения с получением порошков в результате сгорания аэрозольобразующих огнетушащих составов. При использовании БАС для аэрозольного пожаротушения также целесообразно применять подрыв пиротехнических патронов. В качестве аналога этих патронов может выступать ручная огнетушащая пожарная граната типа “Спасатель-01” (SAT119). Патрон представляет собой резервуар со специальным составом воды и химических веществ, которые, смешиваясь при повреждении колбы в результате выстрела в очаг пожара, моментально нейтрализуют огонь.

Доставка рассмотренных пиротехнических патронов с борта БВС в очаг пожара может осуществляться специальным устройством, аналогичным ИСТА 100, 150, 240.

Несмотря на ряд исследований [19, 20] по изучению процессов порошкового и аэрозольного пожаротушения, в настоящее время все же остается проблема, связанная с неопределенностью возможностей по созданию соответствующих пиротехнических патронов и установок, которые могут быть размещены на борту БВС.

Заключение

Таким образом, одним из путей повышения возможностей по тушению пожаров в зданиях повышенной этажности может стать использование БАС для непрерывной горизонтальной подачи в очаг пожара водного раствора или компрессионной пены,

а также для подачи огнетушащих порошков и аэрозолей с помощью порошковых пожарных стволов и пиротехнических патронов. Однако реализация каждого из указанных способов связана с определенными проблемами:

- а) при горизонтальном пожаротушении водой и водными растворами — с недоступностью очагов горения, находящихся на высоте более 280–290 м, и большой потребной грузоподъемностью БВС;
- б) при горизонтальном пожаротушении компрессионной пеной:
 - с необходимостью проведения дополнительных экспериментальных исследований в целях создания методики гидравлического расчета систем горизонтальной и вертикальной подачи пены;
 - с потребностью поиска путей обеспечения безопасности применения БАС в условиях расслоения пены на газообразную и водную составляющие и заполнения рукавной линии раствором воды и ПО в начале и по окончании пожаротушения при ошибках в установке параметров подачи пены и при вынужденной приостановке ее подачи;
- в) при применении огнетушащих порошков и аэрозолей — с неопределенностью возможностей по созданию соответствующего оборудования и установок, которые могут быть размещены на борту БВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов Е. В., Карменичев А. Ю., Николаева Е. Ю. Тактика применения беспилотных летательных аппаратов при тушении пожаров // Пожарная безопасность. — 2013. — № 2. — С. 104–107.
2. Калач А. В., Калач Е. В., Вытовтов А. В. Использование беспилотных воздушных судов для обеспечения пожарной безопасности линейных объектов нефтегазовой отрасли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 12. — С. 49–55. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.49-55.
3. Гидравлика и противопожарное водоснабжение : учебник / Под ред. Ю. Г. Абросимова. — М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. — 392 с.
4. Качанов И. В., Карпенчук И. В., Красовский А. И. Сопротивление пожарных стволов // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2010. — № 2. — С. 58–63.
5. Былинкин В. А., Губин Р. Ю., Мешман Л. М., Романова Е. Ю. Водяное пожаротушение и основные аспекты его развития в институте // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 131–141.
6. Логинов В. И., Ртищев С. М., Козырев В. Н., Брыксин П. В. Пожарное рукавное оборудование — история, современное состояние, перспективы развития // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 150–157.
7. Савин М. В. Исследование пригодности современных математических методов для выбора рациональных типов беспилотных авиационных систем // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. — М. : ВНИИПО, 2016. — Часть 2. — С. 40–48.
8. Синельникова Е. А., Слепцова И. Н., Кротова А. А. Пожарные ручные стволы для подачи компрессионной пены // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXVIII Международной научно-практической конференции. — М. : ВНИИПО, 2016. — Часть 2. — С. 143–147.

9. 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.
10. Камлюк А. Н., Грачулин А. В. Инженерная методика гидравлического расчета прорезиненных рукавных линий пеногенерирующих систем со сжатым воздухом // Вестник Фонда фундаментальных исследований. — 2017. — № 1(79). — С. 51–62.
11. Грачулин А. В. Методы применения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров : автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 2017. — 24 с.
12. 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.
13. Федяев В. Д. Применение компрессионной пены в насосно-рукавных системах при тушении пожаров электрооборудования под напряжением : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2017. — 158 с.
14. Taylor R. G. Technical Report 98: Compressed air foam systems in limited staffing conditions. — Morristown, New Jersey : Morristown Fire Bureau, 1998. — P. 75–112.
15. Colletti D. J. Compressed air foam systems and fire hose // Fire Engineering. — 1996. — Vol. 149. — P. 50–52.
16. McLaughlin W. L. Properties of compressed air foam: executive leadership. — Friday Harbour, Washington : San Juan County Fire District No. 3, 2001.
17. Баратов А. Н., Возман Л. П., Бухтояров Д. В., Чибисов А. Л. Порошковое пожаротушение // Пожарная безопасность. — 2012. — № 2. — С. 120–122.
18. Ульянов Н. И. Обоснование параметров струеобразующих устройств для подачи огнетушащих порошковых составов : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2000. — 206 с.
19. Сабинин О. Ю., Агаларова С. М. Огнетушащие порошки. Проблемы. Состояние вопроса // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2007. — Т. 16, № 6. — С. 63–68.
20. Агафонов В. В., Копылов Н. П. Установки аэрозольного пожаротушения: элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация. — М. : ВНИИПО, 1999. — 232 с.

REFERENCES

1. E. V. Pavlov, A. Yu. Kartenichev, E. Yu. Nikolaeva. Tactics of application of pilotless flying devices at suppression of fires. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2013, no. 2, pp. 104–107 (in Russian).
2. A. V. Kalach, E. V. Kalach, A. V. Vytovtov. Use of free aircraft for ensuring the fire safety of linear objects of oil and gas industry. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 12, pp. 49–55 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.12.49-55.
3. Yu. G. Abrosimov (ed.). *Gidravlika i protivopozharnoye vodosnabzheniye* [Hydraulics and fire water supply]. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2003. 392 p. (in Russian).
4. I. V. Kachanov, I. V. Karpenchuk, A. I. Krasovskiy. Resistance of fire-hose barrels. *Vestnik Belorusskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta / Vestnik of Belarusian National Technical University*, 2010, no. 2, pp. 58–63 (in Russian).
5. V. A. Bylinkin, R. Yu. Gubin, L. M. Meshman, E. Yu. Romanova. Water extinguishment and aspects of its development in the institute. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 131–141 (in Russian).
6. V. I. Loginov, S. M. Rtishchev, V. N. Kozyrev, P. V. Bryksin. History, state-of-the-art and design prospects of fire-fighting hoses. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 150–157 (in Russian).
7. M. V. Savin. Investigation of the suitability of modern mathematical methods for the selection of rational types of unmanned aircraft systems. In: *Aktualnyye problemy pozharnoy bezopasnosti. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of fire safety. Proceedings of XXVIII International Scientific and Practical Conference]. Moscow, VNIPO Publ., 2016, part 2, pp. 40–48 (in Russian).
8. E. A. Sinelnikova, I. N. Sleptsova, A. A. Krotova. Fire hand trucks for compression foam supplying. In: *Aktualnyye problemy pozharnoy bezopasnosti. Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual problems of fire safety. Proceedings of XXVIII International Scientific and Practical Conference]. Moscow, VNIPO Publ., 2016, part 2, pp. 143–147 (in Russian).
9. A. N. Kamlyuk, A. V. Grachulin. Particularities of extinguishing by compressed air foam systems. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MChS Belarusi / Journal of Civil Protection*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 168–175 (in Russian).

10. A. N. Kamluk, A. V. Grachulin. Engineering method of hydraulic calculation of rubber hose lines of compressed air foam system. *Vestnik Fonda fundamentalnykh issledovaniy / Vestnik of the Foundation for Fundamental Research*, 2017, no. 1(79), pp. 51–62 (in Russian).
11. A. V. Grachulin. *Methods of application of compressed air foam systems for extinguishing fires*. Abstr. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Minsk, 2017. 24 p. (in Russian).
12. A. N. Kamluk, O. D. Nawrocki, A. V. Grachulin. Fire extinguishing by compressed air foam systems. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MChS Belarusi / Journal of Civil Protection*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).
13. V. D. Fedyaev. *Application of compression foam in pumping-hose systems for extinguishing fires of electrical equipment under voltage*. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2017. 158 p. (in Russian).
14. R. G. Taylor. *Technical Report 98: Compressed air foam systems in limited staffing conditions*. Morristown, New Jersey, Morristown Fire Bureau, 1998, pp. 75–112.
15. D. J. Colletti. Compressed air foam systems and fire hose. *Fire Engineering*, 1996, vol. 149, pp. 50–52.
16. W. L. McLaughlin. *Properties of compressed air foam: executive leadership*. Friday Harbour, Washington, San Juan County Fire District No. 3, 2001.
17. A. N. Baratov, L. P. Vogman, D. V. Bukhtoyarov, A. L. Chibisov. Dry powder extinguishment. *Pozhar-naya bezopasnost' / Fire Safety*, 2012, no. 2, pp. 120–122 (in Russian).
18. N. I. Ulyanov. Substantiation of jet-forming devices parameters for the fire extinguishing powder compositions supply. Cand. Sci. (Eng.) Diss. Moscow, 2000. 206 p. (in Russian).
19. O. Yu. Sabinin, S. M. Agalarova. Fire extinguishing powders. Problems. State of the question. *Pozharo-vzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*, 2007, vol. 16, no. 6, pp. 63–68 (in Russian).
20. V. V. Agafonov, N. P. Kopylov. *Ustanovki aerosolnogo pozharotusheniya: elementy i kharakteristiki, proyektirovaniye, montazh i ekspluatatsiya* [Aerosol fire extinguishing installations: Elements and characteristics, design, installation and operation]. Moscow, VNIPO Publ., 1999. 232 p. (in Russian).

Поступила 23.05.2019; после доработки 22.06.2019; принята к публикации 26.06.2019
Received 23 May 2019; received in revised form 22 June 2019; accepted 26 June 2019

Информация об авторах

ГОРДИЕНКО Денис Михайлович, д-р техн. наук, начальник ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация;
ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: vniipo@mail.ru

ЛОГИНОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник НИЦ пожарно-спасательной и робототехники, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1418-8780;
e-mail: vniipo_robot@mail.ru

ОСИПОВ Юрий Николаевич, канд. воен. наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИЦ пожарно-спасательной и робототехники, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация;
ORCID: 0000-0002-6668-1844;
e-mail: vniipo_robot@mail.ru

ЕРШОВ Владимир Иванович, канд. воен. наук, доцент, старший научный сотрудник НИЦ пожарно-спасательной и робототехники, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9064-2805; e-mail: vniipo_robot@mail.ru

МИХАЙЛОВА Елена Дмитриевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИЦ нормативно-технических проблем пожарной безопасности, ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха Московской области, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-5847-9590;
e-mail: chaika-med@yandex.ru

Information about the authors

Denis M. GORDIENKO, Dr. Sci. (Eng.), Head of All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5849-6956; e-mail: vniipo@mail.ru

Vladimir I. LOGINOV, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Chief Researcher of Research Center of Fire Rescue Technique and Robotics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1418-8780; e-mail: vniipo_robot@mail.ru

Yuri N. OSIPOV, Cand. Sci. (Military), Professor, Leading Researcher of Research Center of Fire Rescue Technique and Robotics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6668-1844;
e-mail: vniipo_robot@mail.ru

Vladimir I. ERSHOV, Cand. Sci. (Military), Associate Professor, Senior Researcher of Research Center of Fire Rescue Technique and Robotics, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9064-2805; e-mail: vniipo_robot@mail.ru

Elena D. MIKHAYLOVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Research Center for Regulatory and Technical Problems of Fire Safety, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5847-9590; e-mail: chaika-med@yandex.ru