

УДК 614.844.2

## СВЕРХЗВУКОВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ВОДЫ ДЛЯ ОБЪЕМНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Пахомов Георгий Борисович, Елфимова Марина Владимировна,  
Тужиков Евгений Николаевич

Уральский институт ГПС МЧС России, г. Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

Создан прототип гибридной установки объемного пожаротушения, в котором реализован механизм создания мелкодисперсного водяного тумана путем распыления жидкости сверхзвуковым газовым потоком. Проведено экспериментальное определение скоростей и расходов потоков воды и азота при различных соотношениях массового расхода воды к расходу азота. На основании экспериментальных данных построена аналитическая зависимость зауреровского диаметра для распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота. Проведена экспериментальная оценка дисперсности распыления, которая оказалась значительно выше, чем расчетная что объясняется более высокой скоростью распыляющего газа, чем в предыдущих исследованиях. Для созданного прототипа гибридной установки пожаротушения получено самое высокое из известных соотношение расхода жидкости к расходу распыляющего газа, выше которого генерирование устойчивого мелкодисперсного водяного тумана трудноосуществимо.

**Ключевые слова:** гибридное пожаротушение, двухфазное распыление, дисперсность воды, мелкодисперсный водяной туман, объемное тушение

## SUPERSONIC WATER SPRAYING FOR VOLUMETRIC FIRE EXTINGUISHING

Georgy B. Pakhomov, Marina V. Elfimova, Evgenij N. Tuzhikov

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

### ABSTRACT

A prototype of a hybrid volumetric fire extinguishing system has been created, which implements a mechanism for creating a fine water mist by spraying liquid with a supersonic gas flow. Experimental determination of the velocities and flow rates of water and nitrogen flows at different ratios of mass water flow to nitrogen flow is carried out. Based on experimental data, an analytical dependence of the Sauter mean diameter for the sprayed water on the ratio of the mass flow rate of water to the nitrogen flow rate is constructed. An experimental assessment of the dispersion of spraying was carried out, which turned out to be significantly higher than the calculated one, which is explained by a higher rate of spraying gas than in previous studies. For the created prototype of a hybrid fire extinguishing system, the highest known ratio of liquid flow to atomizing gas flow was obtained, above which the generation of stable fine-dispersed water mist is difficult to achieve.

**Keywords:** hybrid suppression systems, two-phase spraying, water dispersion, fine water mist, volumetric extinguishing

### Введение

Противопожарная защита особо важных зданий и помещений, таких как объекты со сложным и дорогостоящим электронным и/или лабораторно-промышленным оборудованием, музеи, библиотеки и т. д., где величина ущерба от воздействия огнетушащих веществ является наиболее критичной, требует новых подходов в создании соответствующих пожаротушащих систем.

Применение на таких объектах установок объемного газового тушения, казалось бы, решает или минимизирует проблему ущерба от воздействия огнетушащих веществ. Однако системы объемного газового тушения имеют ряд существенных недостатков и ограничений в применении: высокая стоимость, как самой системы, так и ее периодического обслуживания и перезарядки; газовые системы недостаточно эффективны для тушения тлеющих материалов и требуют герметичности помещения и соответствующих вентиляционных каналов; необходима предварительная эвакуация людей из зоны применения таких систем. Высокоинтенсивный выброс большого объема газа под высоким давлением может вызвать повреждение дорогостоящего электронного и/или лабораторно-промышленного оборудования, музейных и библиотечных ценностей. Например, установлено, что компьютерные диски хранения данных зачастую повреждаются из-за высокого уровня звукового давления при срабатывании системы газового пожаротушения.

На основании вышеизложенного можно заключить, что исследование и разработка новых систем объемного пожаротушения, лишенных указанных недостатков, является актуальной задачей.

Вода (включая водные растворы) до сих пор остается самым доступным и распространенным огнетушащим веществом. Новые методы и способы применения воды при пожаротушении позволяют значительно увеличить ее огнетушащую эффективность, в первую очередь за счет повышения дисперсности генерируемых капель воды, что, в свою очередь, приводит как к повышению эффективности действующих, так и к появлению новых, не характерных для воды грубого распыла, механизмов тушения.

В ГОСТ Р 53288-2009 указано, что тонкораспыленным считается капельный поток огнетушащей жидкости со среднеарифметическим диаметром капель не более 150 мкм.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями доказано, что при достаточно высокой дисперсности и интенсивности подачи тонкораспыленной воды (ТРВ) может достигаться эффект объемного пожаротушения в замкнутых отсеках или помещениях [1, 2].

ТРВ со среднеарифметическим диаметром капель выше  $\approx 70$  мкм и нормативной интенсивностью подачи, в соответствии с известными графиками дисперсного распределения капель, не может обеспечить объемного пожаротушения, т. к. концентрация капель, способных длительное время оставаться в объеме помещения, в этом случае будет недостаточной.

Более подходящим критерием дисперсности капель для пожаротушения является средний объемно-поверхностный диаметр по Заутеру –  $D_{32}$ . Верхняя граница значений  $D_{32}$  для капель воды, обеспечивающая возможность объемного пожаротушения при соответствующей

интенсивности подачи, по данным различных исследователей находится в диапазоне от 20 до 90 мкм [2].

В последние годы за рубежом активно развивается новая технология пожаротушения – так называемые гибридные системы пожаротушения (Hybrid Suppression Systems), применяемые для защиты различных помещений с малой степенью негерметичности. В этих системах для объемного тушения пожара используется инертный газ (обычно азот) в сочетании с мелкодисперсным водяным туманом (МВТ), в котором заутеровский диаметр капель  $D_{32}$  не превышает нескольких десятков микрон, что позволяет создать в защищаемом объеме устойчивый водяной туман. МВТ в этом случае генерируется по двухфазному механизму распыления, при этом эффективность тушения во многих случаях выше, чем у систем, в которых используется только инертный газ или только ТРВ [3].

Основное преимущество гибридных систем пожаротушения заключается в том, что они сочетают в себе достоинства ТРВ и систем газового пожаротушения, при этом возможный ущерб от воздействия огнетушащих веществ минимален. В настоящее время эта инновационная технология все чаще используется за рубежом в стационарных системах пожаротушения.

Все возрастающее внимание к гибридным системам пожаротушения может быть охарактеризовано как разработкой и совершенствованием нормативной базы для таких устройств, в частности за рубежом действуют следующие стандарты, посвященные именно гибридным системам: FM Approvals Standard 5580 (2012); NFPA 770 (2020), так и появлением нескольких производителей, которые представляют на зарубежном рынке гибридные системы пожаротушения. Из представленных на рынке наиболее известны следующие гибридные системы

пожаротушения: Aquasonic, разработанная и производимая компанией ANSUL, и система Vortex, разработанная и производимая компанией Victaulic [3].

В нашей стране направление гибридного пожаротушения только начинает развиваться, нами найдено лишь несколько отечественных журнальных статей, посвященных этой тематике [2, 4, 5]. Отсюда следует вывод об актуальности проведения научно-исследовательских работ, направленных на создание отечественной гибридной системы объемного пожаротушения.

В последние десятилетия получили распространение устройства и установки пожаротушения с применением двухфазной технологии распыления огнетушащей жидкости расширяющимся газом. Вне зависимости от способа технической реализации двухфазного распыления можно назвать следующие общие характеристики таких систем:  $D_{32}$  капель распыленной жидкости находится вблизи значения в 100 мкм, отношение массовых расходов жидкости и газа  $G_{ж}/G_{г}$  находится в пределах от 15 до 40 [6].

Как следует из самых общих соображений, для получения большей дисперсности при двухфазном распылении необходимо уменьшать отношение расхода жидкости и газа, а также увеличивать скорость, с которой газ и распыляемая жидкость сталкиваются друг с другом.

Создание и повышение эффективности гибридных установок пожаротушения требует оптимизации многих параметров, зачастую имеющих обратную взаимосвязь. Задачей настоящего исследования является разработка конструкции и оптимизация параметров прототипа гибридной системы объемного пожаротушения.

### Результаты и их обсуждение

Обозначения и исходные данные:

- $\Delta P$  – усредненное избыточное давление воды и азота на входе в сопла (2,5 МПа);
  - $G_{ж}$  – массовый расход воды, кг/с;
  - $G_{г}$  – усредненный массовый расход азота (0,09 кг/с);
  - $D_{32}$  – заутеровский диаметр капле распыляемой воды, мкм;
  - $V_{г}$  – усредненная скорость азота на выходе из газового сопла (560 м/с);
  - $V_{ж}$  – усредненная скорость воды на выходе из водяного сопла (69 м/с);
  - $P_0$  – усредненное атмосферное давление при измерениях (0,098 МПа);
  - $T$  – усредненная температура окружающего воздуха при измерениях (297 К);
  - $S$  – площадь водяного сопла, м<sup>2</sup>;
  - $R$  – газовая постоянная для азота (297 Дж/кг·К);
  - $k$  – показатель адиабаты для азота (1,4);
  - $\rho_{г}$  – плотность азота (1,1 кг/м<sup>3</sup>);
  - $\rho_{ж}$  – плотность воды (1000 кг/м<sup>3</sup>);
  - $\alpha$  – угол встречи потоков воды и азота (60°);
  - $\eta$  – вязкость воды (0,01 пз);
  - $\gamma$  – поверхностное натяжение воды (72 дин/см);
  - $\varphi$  – коэффициент скорости истечения для водяного сопла (0,98);
- усредненная относительная влажность окружающего воздуха  $\approx 70$  %.
- Кроме параметров самого защищаемого помещения (геометрии, пожарной нагрузки, негерметичности и возможных

сценариев пожара) эффективность пожаротушения будет определяться следующими характеристиками гибридной установки пожаротушения: дисперсностью, интенсивностью подачи и временем достижения во всем объеме помещения пожаротушающей концентрации МВТ. Эти характеристики гибридных установок пожаротушения зачастую имеют обратную взаимосвязь, что усложняет задачу по их разработке.

Определим граничные условия и основные параметры для разработки прототипа гибридной установки пожаротушения.

Из литературных источников известно, что эффективность гибридного пожаротушения увеличивается по мере увеличения расхода воды подаваемой на тушение, при этом должна сохраняться требуемая для объемного пожаротушения дисперсность распыления [7]. Из этого следует, что при разработке гибридной системы пожаротушения необходимо добиваться достижения максимального значения соотношения массового расхода воды к расходу распыляющего газа, при котором генерируется устойчивый МВТ.

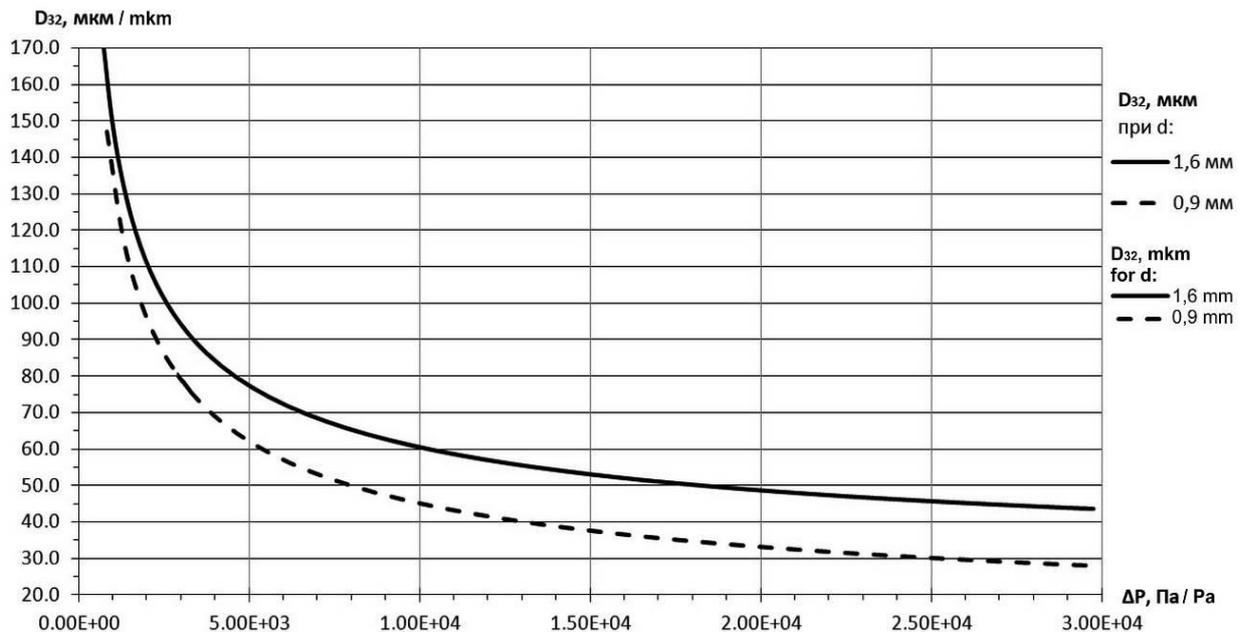
В предыдущих исследованиях показано, что в самом общем случае при распылении жидкости скоростным газовым потоком дисперсность жидкости увеличивается при увеличении давления подачи газа и снижении соотношения расхода жидкости к расходу распыляющего газа.

Дисперсность капле при распылении жидкости скоростным газовым потоком может быть определена на основании эмпирической формулы для вычисления заутеровского диаметра, полученной Накиямой и Танасавой [8]. Если заменить объемные расходы жидкости и газа в указанной формуле на их массовые эквиваленты, формулу  $D_{32}$  можно записать в следующем виде:

$$D_{32} = \frac{585}{V_{\Gamma} - V_{\text{ж}}} \left( \frac{\gamma}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} + 597 \left( \frac{\eta}{(\gamma \rho_{\text{ж}})^{0,5}} \right)^{0,45} \left( \frac{\rho_{\Gamma} G_{\text{ж}}}{G_{\Gamma}} \right)^{1,5} \quad (1)$$

В работе [9] получены расчетные зависимости заутеровского диаметра  $D_{32}$  капель воды, распыляемой скоростным потоком воздуха, от давления распыляющего воздуха  $\Delta P$ , (рис. 1) для двух водяных

сопел диаметром  $d$  1,6 и 0,9 мм, выполненные по формуле (1); соотношения массового расхода воды к расходу воздуха  $G_{\text{ж}}/G_{\Gamma}$  для этих сопел – 0,64 и 0,22 соответственно.



**Рис. 1.** Расчетные зависимости заутеровского диаметра распыляемой воды от давления распыления для двух водяных сопел

**Fig. 1.** Calculated dependences of the Sauter diameter of the sprayed water on the spray pressure for two water nozzles

Из графика (рис. 1) следует, что: при росте давления распыления уменьшается заутеровский диаметр для капель распыляемой воды, т. е. дисперсность распыления повышается за счет увеличения скорости, с которой воздух и распыляемая вода сталкиваются друг с другом  $V_{\Gamma} - V_{\text{ж}}$ ; при снижении соотношения расхода воды к расходу воздуха, уменьшается заутеровский диаметр для капель распыляемой воды, т.е. дисперсность распыления также повышается. Эти выводы согласуются с данными, полученными в других работах [8].

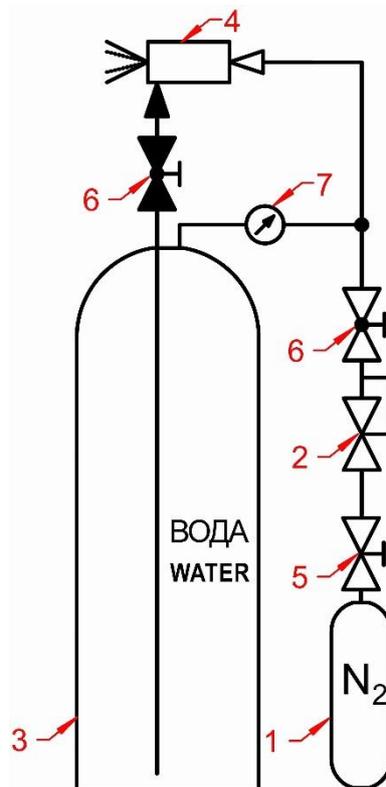
Для исследования процесса распыления жидкости был создан прототип

гибридной установки пожаротушения, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Работа системы основана на взаимодействии сверхзвукового потока азота со щелевой струей воды с образованием двухфазного факела МВТ. Исследования проводились при различном соотношении расхода воды к расходу азота.

В установке (рис. 2) сжатый азот содержится в газовом баллоне высокого давления (1), выход из которого соединен с высокопроизводительным газовым редуктором высокого давления (2); после редуктора азот под давлением  $\approx 2,5$  МПа поступает в бак с водой (3) и одновре-

менно к двухфазной распылительной форсунке 4; вода из бака поступает одновременно с азотом к распылительной форсунке, где формируется высокоскоростной газожидкостный поток.

Давление распыления  $\approx 2,5$  МПа было выбрано из следующих соображений: как показано выше, при увеличении давления, дисперсность распыления увеличивается; с другой стороны, увеличение



**Рис. 2.** Схема прототипа гибридной установки пожаротушения где: 1 – газовый баллон высокого давления; 2 – высокопроизводительный газовый редуктор; 3 – бак с водой; 4 – распылительная форсунка; 5 – баллонный вентиль; 6 – шаровые краны; 7 – манометр  
**Fig. 2.** Diagram of the prototype of a hybrid fire extinguishing system where: 1 – high-pressure gas cylinder; 2 – high-performance gas reducer; 3 – water tank; 4 – spray nozzle; 5 – balloon valve; 6 – ball valves; 7 – pressure gauge

давления свыше 2,5 МПа приводит к повышенным нормативным требованиям для установок пожаротушения.

Сопла Лавалья представляют собой профилированные каналы с входным конфузором и выходным диффузором, такие сопла широко используются в различных областях науки и техники как наиболее простые и эффективные устройства для получения сверхзвуковых газовых потоков [10].

Для нашего случая сопло Лавалья с центральным осесимметричным профилированным каналом является наиболее эффективным при преобразовании избыточного давления газа в его кинетическую энергию; т. к. у указанного сопла наибольшее соотношение площади критического сечения к площади ограждающих поверхностей сопла, что ведет к уменьшению сопротивления газового потока внутри проектируемого сопла.

Расчет геометрических характеристик сопла Лавалья и его проектирование проводилось на основании предварительных опытов по определению расходных характеристик высокопроизводительного газового редуктора высокого давления, который был выбран как наиболее соответствующий целям настоящего исследования из доступных на рынке. Расчет сопла Лавалья проводился на основании известной методики вычисления

скорости газа с использованием одномерных уравнений для изоэнтропического потока идеального газа, которая изложена, например, в работах [10, 11]. При расчете предполагается, что поток – одномерный, газ – идеальный и совершенный, течение – изоэнтропическое. В таблице приведены исходные параметры и выходные расчетные характеристики для разработанного сопла Лавалья.

**Таблица.** Исходные параметры и выходные расчетные характеристики для разработанного сопла Лавалья

**Table**  
Initial parameters and output design characteristics for the developed Laval nozzle

$\Delta P$ , МПа $\Delta P$ , МПа	$P_0$ , МПа $P_0$ , МПа	$T$ , К	$G_r$ , кг/с $G_{gas}$ , kg/s	$R$ , Дж/кг·К $R$ , J/kg·K	$k$	$V_r$ (расчет), м/с $V_{gas}$ calc
2,5	0,098	297	0,09	297	1,4	610

Для соблюдения условия изоэнтропичности газового потока изменение его параметров по длине сопла Лавалья должно быть плавное и постепенное. Исходя из этого условия были выбраны длины конфузора и диффузора проектируемого сопла. Для максимально плавного изменения параметров газового потока по длине сопла, конфузор и диффузор были выполнены коноидальной формы, пример построения коноидального профиля приведен в работе [12]. Сопло Лавалья (рис. 3), для максимального соответствия спроектированной геометрии и снижения сопротивления газовому потоку, изготовлено из полимера методом 3D-принтинга с тщательной полировкой внутренней поверхности.

В распылительной форсунке подача воды в сверхзвуковой поток азота осуществляется через щелевое кольцевое сопло, расположенное за выходным срезом сопла Лавалья. Образующие водяного сопла также выполнены коноидальной формы и отполированы. Для увеличения

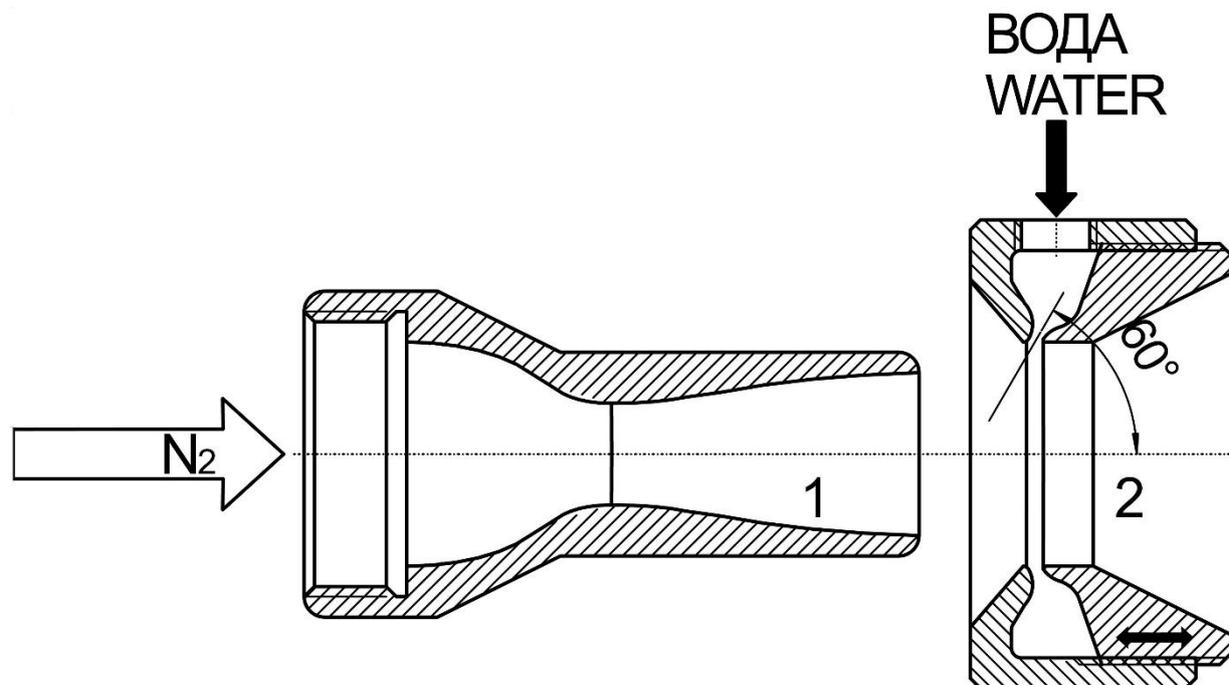
скорости, с которой азот и распыляемая вода сталкиваются друг с другом, подача воды происходит во встречном направлении к потоку азота; угол встречи потоков  $\alpha$  равен  $60^\circ$ . Для изменения соотношения расхода воды к расходу азота ширина щелевого сопла выполнена регулируемой. Наличие плавного и оперативного регулирования соотношения расхода воды к расходу азота значительно расширяют возможности данной системы по применению для различных сценариев пожара и защищаемых объемов. На рис. 3 приведено схематическое изображение продольного разреза распылительной форсунки.

Экспериментальное определение скорости потока азота из разработанного сверхзвукового сопла проводилось с помощью программно-аппаратного комплекса для экспериментального определения параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости [12]. Во время проведения экспериментов по определению

скорости потока азота вода в распылительную форсунку не подавалась.

Усредненное значение экспериментально определенной скорости потока азота  $V_T$  при указанных выше условиях эксперимента составило 560 м/с – это значение достаточно близко к скорости азота,

полученной при расчетном режиме работы сопла Лавалья (см. табл.); что доказывает справедливость вышеуказанных допущений при расчете и проектировании сверхзвукового газового сопла.



**Рис. 3.** Продольный разрез распылительной форсунки где: 1 сопло Лавалья; 2 щелевое кольцевое водяное сопло

**Fig. 3.** Longitudinal section of the spray nozzle where: 1 Laval nozzle; 2 slotted annular water nozzle

Коноидальные жидкостные сопла обладают наименьшими гидравлическими потерями и у них практически отсутствует эффект сжатия струи, следовательно, скорость истечения жидкости при постоянном давлении подачи остается также неизменной вне зависимости от площади сопла. Скорость истечения, в пределах ошибки измерения, во всех опытах соответствовала закону Торричелли с учетом коэффициента скорости истечения для применяемых коноидальных сопел –  $\phi = 0,98$  [12].

Во всех опытах давление распыления поддерживалось примерно постоянным и находилось в диапазоне  $\Delta P = 2,4 - 2,6$  МПа. Скорость истечения

воды из кольцевого сопла в распылительной форсунке ( $V_{ж}$ ) может быть определена по формуле (2):

$$V_{ж} = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ж}}} \quad (2)$$

Скорость воды ( $V_{ж}$ ) на выходе из сопла при  $\Delta P = 2,5$  МПа, вычисленная по формуле (2) – составляет 69 м/с.

Другое выражение для скорости подачи воды (3) может быть получено из экспериментально определенных расходов воды ( $G_{ж}$ ) и площадей выходного сечения кольцевого сопла  $S$  при условиях несжимаемости жидкости, отсутствия сжатия струи, неразрывности и непрерывно-

сти течения. Отсутствие сжатия струи является одной из характеристик коноидальных сопел [12].

$$V_{\text{ж}} = \frac{G_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} S} \quad (3)$$

Усредненная скорость воды на выходе из сопла, определенная на основании экспериментальных данных по формуле (3), в пределах ошибки измерения совпадает со скоростью, вычисленной по формуле (2), что доказывает справедливость вышеуказанных допущений относительно водяного сопла.

Для оценки качества распыления разработанным прототипом гибридной установки пожаротушения были проведены опыты по распылению воды сверхзвуковым потоком азота. Опыт проводился при различном соотношении расхода

воды к расходу азота, длительность каждого опыта по распылению составляла около 5 с.; остальные характеристики и параметры распыления приведены выше. После завершения каждого опыта взвешиванием определялись массовые расходы воды и азота. В расходе газа не учитывалась та часть азота, которая затрачивалась на вытеснение воды из бака.

Оценить дисперсность распыления исходя из экспериментальных данных по расходным характеристикам распылительной форсунки можно на основании формулы (1). Если учесть, что потоки азота и воды в разработанной форсунке движутся навстречу друг другу под углом  $\alpha$ , формулу (1) для расчета заутеровского диаметра –  $D_{32}$  можно записать в следующем виде (4):

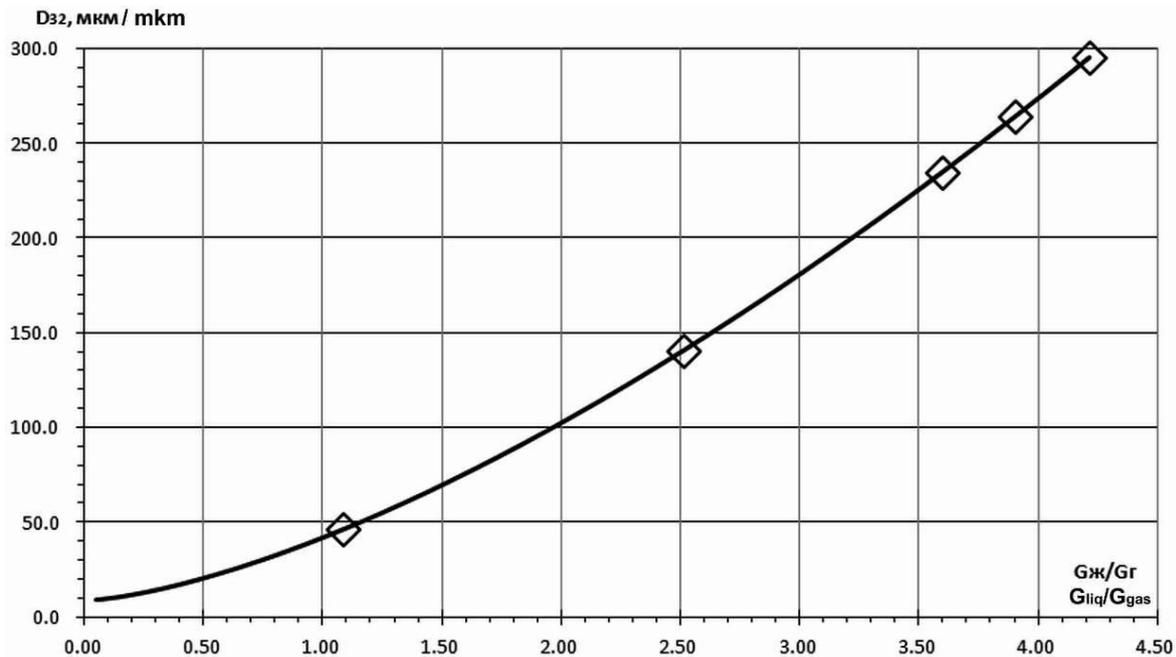
$$D_{32} = \frac{585}{V_{\Gamma} + \cos \alpha V_{\text{ж}}} \left( \frac{\gamma}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} + 597 \left( \frac{\eta}{(\gamma \rho_{\text{ж}})^{0,5}} \right)^{0,45} \left( \frac{\rho_{\Gamma} G_{\text{ж}}}{G_{\Gamma}} \right)^{1,5} \quad (4)$$

На рис. 4 приведена зависимость заутеровского диаметра –  $D_{32}$  распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота  $G_{\text{ж}}/G_{\Gamma}$ . На графике в виде линии приведена аналитическая зависимость, рассчитанная по формуле (4) с учетом экспериментальных данных по расходным характеристикам распылительной форсунки, маркеры соответствуют значениям  $G_{\text{ж}}/G_{\Gamma}$ , при которых проводились опыты по распылению.

Из рис. 4 следует, что при увеличении соотношения расхода жидкости к расходу распыляющего газа и при прочих

неизменных условиях распыления заутеровский диаметр распыляемой воды растет по экспоненциальному закону.

Опыты по распылению проводились в помещении размерами в плане 6×18 м и высотой 5 м. Факел распыления ориентировался по длинной оси помещения с учетом исключения его контакта с ограждающими конструкциями. Видимая высота нижней границы факела МВТ в его конечной части находилась на уровне  $\approx 2$  м от поверхности пола. Относительная влажность окружающего воздуха во время экспериментов по распылению была вблизи 70 %.



**Рис. 4.** Зависимость заутеровского диаметра распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота

**Fig. 4.** The dependence of the Sauter diameter of the sprayed water on the ratio of the mass flow rate of water to the nitrogen flow rate

После каждого опыта по распылению, для приведения влажности в помещении к исходному значению, проводилось интенсивное вентилирование помещения. Характерная фотография факела распыления при соотношении массового

расхода воды к расходу азота –  $G_{ж}/G_{г} = 2,5$  приведена, на рис. 5.

Оценить дисперсность распыления можно исходя из визуального наблюдения гравитационного осаждения капель распыляемой воды на поверхность пола.



**Рис. 5.** Фотография факела распыления

**Fig. 5.** Photo of the spray plume

Осаждение капель на поверхность пола наблюдалось только при  $G_{ж}/G_{г} = 4,2$ , следовательно, в этом случае самые крупные капли в факеле распыления не успевали испариться за время седиментации на поверхность пола с высоты  $\approx 2$  м. Для определения соответствия графика приведенного на рис. 4 экспериментальным данным оценим размер этих капель. В работе [13] проведены результаты экспериментального исследования кинетики водных капель в воздушной среде. В указанной работе установлено, что при температуре и влажности окружающего воздуха близких к их значениям в настоящем исследовании, капли воды с диаметром  $\geq 130$  мкм достигают поверхности пола при гравитационном осаждении с высоты 2 м; более мелкие капли успевают полностью испариться еще до их осаждения на поверхность пола. Полученные результаты свидетельствуют, что для применяемых в настоящей работе условий распыления генерация МВТ с  $G_{ж}/G_{г} \geq 4,2$  нецелесообразна для целей объемного пожаротушения, т. к. в этом случае наиболее значительный вклад в нестабильность МВТ будет вносить гравитационное осаждение капель. Полученное граничное значение  $G_{ж}/G_{г}=4,2$  является самым большим из тех, что нами найдены в литературных источниках, посвященных получению устойчивых МВТ для целей объемного пожаротушения [14].

Из полученных данных следует, что значения  $D_{32}$  распыляемой воды, вычисленные по уравнению (4), значительно выше, чем определенные из эксперимента. Это обстоятельство можно объяснить тем, что формула (4) признана достаточно достоверной для скоростей течения распыляющего газа с числом Маха до 2 включительно, а в настоящем исследовании скорость азота соответствовала числу Маха  $\approx 2,5$ . Последний вывод подтверждается результатами других исследований.

На основе оценочного значения диаметра самых крупных капель в факеле распыления  $D_{max} = 130$  мкм для условия  $G_{ж}/G_{г} = 4,2$ , можно оценить соответствующее значение  $D_{32}$ . Как следует из приведенных в литературе [8, 15] примеров, распределение капель по размерам для распыления жидкостей скоростным газовым потоком в сходных с настоящим исследованием диапазонах дисперсности распыления,  $D_{max} \approx 2D_{32}$ , следовательно, в настоящем исследовании для граничного значения –  $G_{ж}/G_{г} = 4,2$  можно принять, что  $D_{32} = 65$  мкм – это значение является верхней границей значений  $D_{32}$  для капель воды, обеспечивающей, при соответствующей интенсивности подачи, возможность объемного пожаротушения. По данным других исследований  $D_{32} = 65$  мкм, что как раз находится в середине диапазона  $D_{32}$ , при котором возможно объемное пожаротушение – от 20 до 90 мкм [2].

#### Выводы

Из проведенного анализа технологий пожаротушения для объектов, где особенно важна минимизация ущерба от воздействия огнетушащих веществ, сделан вывод о необходимости создания отечественной гибридной системы объемного пожаротушения.

На основании определения граничных условий и решения системы одномерных уравнений для изоэнтропического потока идеального газа проведен расчет и проектирование сопла Лаваля, что позволило разработать прототип гибридной системы объемного пожаротушения, в котором реализован механизм создания мелкодисперсного водяного тумана путем распыления жидкости сверхзвуковым газовым потоком. Наличие плавного и оперативного регулирования соотношения расхода воды к расходу азота значительно расширяют возможности данной системы

по применению для различных сценариев пожара и защищаемых объемов.

Для созданного прототипа гибридной установки проведено экспериментальное определение скоростей и расходов потоков воды и азота при различных соотношениях массового расхода воды к расходу азота. На основании экспериментальных данных построена аналитическая зависимость заутеровского диаметра для распыляемой воды от соотношения массового расхода воды к расходу азота.

Из сравнения скоростей гравитационного осаждения и испарения капель распыляемой воды проведена экспериментальная оценка дисперсности распыления, которая оказалась значительно выше, чем

расчетная. Это обстоятельство можно объяснить тем, что расчетные значения достаточно достоверны для скоростей течения распыляющего газа с числом Маха до 2 включительно, в то время как в настоящем исследовании скорость азота соответствовала числу Маха  $\approx 2,5$ .

Полученное граничное значение соотношения массового расхода воды к расходу азота, выше которого, для созданного прототипа гибридной установки получение устойчивого МВТ трудноосуществимо, является самым большим из тех, что нами найдены в литературных источниках посвященных получению устойчивых МВТ для целей объемного пожаротушения.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Душкин А. Л., Ловчинский С. Е., Рязанцев Н. Н. Экранирование тонкораспыленной водой излучения от пожара // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 6. С. 52–59.
2. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А. Л. Душкин и др. // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 3. С. 60–69.
3. Raia P., Gollner M. Literature Review on Hybrid Fire Suppression Systems // Fire Protection Research Foundation. May 2014. 32 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Literature-Review-on-Hybrid-Fire-Suppression-Raia-Gollner/e41157bd2f21be850a9106e30b55be7c078766e8> (дата обращения: 16.01.2023).
4. Механизм тушения пламени газодводящими составами ультрадисперсного распыла / С. Н. Копылов, А. В. Казаков, Д. В. Бухтояров и др. // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 67–71.
5. Казаков А. В., Смирнов Н. В., Гладилин А. В. Исследование газодводящих составов ультрадисперсного распыла для установок пожаротушения // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 7. С. 60–65.
6. Антоновский И. В. Исследование формирования двухфазных газодводящих струй: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 147 с.
7. Gałaj J., Tuśnio N., Wolny P., Drzymała T. Analysis of the impact of water flow rate on the temperature variability in a closed room during the extinguishing of A-group fire using a hybrid water mist suppression system // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – 8700. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8700/htm> (дата обращения: 16.01.2023).
8. Nukiyama S, Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an air stream // Trans. Soc. Mech. Eng. Japan. 1939. Vol. 5. P. 68–75. DOI: 10.1063/1.1723225.
9. Пахомов Г. Б., Дульцев С. Н., Тужиков Е. Н. Влияние характеристик распыления и свойств огнетушащих жидкостей на конвекционный ток, образуемый заряженными каплями // Техносферная безопасность. 2021. № 2 (31). С. 48–60.
10. Дорофеев А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. М., 2014. 576 с.
11. Ковальногов Н. Н. Прикладная механика жидкости и газа. Ульяновск, 2010. 219 с.
12. Пахомов Г. Б., Дульцев С. Н., Тужиков Е. Н. Программно-аппаратный комплекс для экспериментального исследования параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости // Техносферная безопасность. 2020. № 2 (27). С. 107–121.
13. Wells W.F. On air-borne infection: study II. Droplets and droplet nuclei // American Journal of Hygiene. 1934. Vol. 20. P. 611–618. URL: <https://academic.oup.com/aje/article-abstract/20/3/611/280025?redirectedFrom=fulltext&login=false>.
14. Forssell E.W., Scheffey J.L., DiNenno P.J., Back G.G. False deck development testing of hybrid nitrogen – water mist fire suppression systems // URL: [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire\\_research/R0401171.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R0401171.pdf) (дата обращения: 16.01.2023).

15. Попов С. П. Исследование эффективности тушения модельного очага пожара вязких нефтепродуктов потоком переувлажненного воздуха: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2007. 139 с.

## REFERENCES

1. Dushkin A.L., Lovchinsky S.E., Ryazantsev N.N. Shielding of radiation from fire with thinly sprayed water. *Pozharovzryvobezопасnost*. 2017; 6:52–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29811487> (rus).
2. Dushkin A.L., Lovchinsky S.E., Ryazantsev N.N., Segal M.D. Features of fire extinguishing in a closed volume with thinly sprayed water. *Fire and explosion safety*. 2017; 3:60–69. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28949554> (rus).
3. Raia P., Gollner M. Literature Review on Hybrid Fire Suppression Systems // Fire Protection Research Foundation. May 2014; 32. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Literature-Review-on-Hybrid-Fire-Suppression-Raia-Gollner/e41157bd2f21be850a9106e30b55be7c078766e8>.
4. Kopylov S.N., Kazakov A.V., Bukhtoyarov D.V., etc. The mechanism of extinguishing the flame with gas-water compositions of ultrafine spray. *Fire safety*. 2014; 2:67–71. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21617135> (rus).
5. Kazakov A.V., Smirnov N.V., Gladilin A.V. Investigation of gas-water compositions of ultrafine spray for fire extinguishing installations. *Occupational safety in industry*. 2021; 7:60–65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46388764> (rus).
6. Antonovsky I.V. Investigation of the formation of two-phase gas-drop jets // Diss. Candidate of Technical Sciences, M., MAI, 2016; 147. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30446473> (rus).
7. Gałaj J., Tuśnio N., Wolny P., Drzymała T. Analysis of the impact of water flow rate on the temperature variability in a closed room during the extinguishing of A-group fire using a hybrid water mist suppression system. *Sustainability*. 2020; 12: 8700. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8700/htm>.
8. Nukiyama S, Tanasawa Y. Experiments on the atomization of liquids in an air stream. *Trans. Soc. Mech. Eng. Japan*. 1939; 5:68–75. DOI: 10.1063/1.1723225.
9. Pakhomov G.B., Dultsev S.N., Tuzhikov E.N. Influence of spraying characteristics and properties of extinguishing liquids on the convection current generated by charged droplets. *Technosphere safety*. 2021; 2(31): 48–60. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46297695> (rus).
10. Dorofeev A.A. Fundamentals of the theory of thermal rocket engines. Moscow: MSTU, 2014. 576. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25070160> (rus).
11. Kovalnogov N.N. Applied mechanics of liquid and gas. Ulyanovsk: ULSTU 2010; 219. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19463155> (rus).
12. Pakhomov G.B., Dultsev S.N., Tuzhikov E.N. Software and hardware complex for experimental study of parameters of devices with high-speed liquid supply. *Technosphere safety*. 2020; 2 (27): 107–121. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43080160> (rus).
13. Wells W.F. On air-borne infection: study II. Droplets and droplet nuclei. *American Journal of Hygiene*. 1934; 20: 611–618. URL: <https://academic.oup.com/aje/article-abstract/20/3/611/280025?redirectedFrom=fulltext&login=false>.
14. Forssell E.W., Scheffey J.L., DiNenno P.J., Back G.G. False deck development testing of hybrid nitrogen – water mist fire suppression systems. URL: [https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire\\_research/R0401171.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/el/fire_research/R0401171.pdf).
15. Попов С.П. Исследование эффективности тушения модельного очага пожара вязких нефтепродуктов с потоком переувлажненного воздуха. Дис. канд. техн. наук. СПб., 2007. 139 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16124096> (rus).

## Информация об авторах

**Пахомов Георгий Борисович**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID 51866; e-mail: [georgy400@yandex.ru](mailto:georgy400@yandex.ru)

## Information about the authors

**Georgy B. Pakhomov**, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Research Department, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID 51866; e-mail: [georgy400@yandex.ru](mailto:georgy400@yandex.ru)

**Елфимова Марина Владимировна**, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника института по научной работе, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID 818459

**Тужиков Евгений Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; Author ID 759898

**Marina V. Elfimova**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Institute for Scientific Work, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID 818459

**Evgenij N. Tuzhikov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fire, Emergency and Rescue Equipment, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; Author ID 759898