

УДК 614.845.2

fireman87@bk.ru

**СОЗДАНИЕ ПЕРЕНОСНОГО ДВУХФАЗНОГО УСТРОЙСТВА
ПОЖАРОТУШЕНИЯ С ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОДАЧЕЙ
ОГNETУШАЩЕЙ ЖИДКОСТИ****CREATION OF A PORTABLE TWO-PHASE FIRE EXTINGUISHING DEVICE
WITH HIGH-SPEED SUPPLY OF EXTINGUISHING LIQUID**

*Пахомов Г. Б., кандидат химических наук,
Тужиков Е. Н., кандидат технических наук, доцент,
Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург*

*Pakhomov G., Tuzhikov E.,
The Ural Institute of State Firefighting Service of Ministry
of Russian Federation for Civil Defense, Yekaterinburg*

На основе выбора и анализа граничных условий для переносных устройств пожаротушения с высокоскоростной подачей огнетушащей жидкости (ОТЖ) создано устройство пожаротушения, превосходящее по основным характеристикам имеющиеся аналоги. Созданное устройство имеет наименьшую конструкционную массу и наибольшие значения: расхода ОТЖ, вместимости емкости для ОТЖ и весовой эффективности. В процессе исследования была получена зависимость максимальной теоретической скорости подачи водо-воздушного потока от давления распыления. Исходя из выявленных зависимостей, были установлены оптимальные значения: давления распыления, расходов вода/воздух и их массового соотношения. При экспериментальном исследовании были найдены соответствующие проходные сечения в камере смешения вода/воздух и геометрические характеристики распылительного сопла, при которых экспериментальная скорость подачи водо-воздушного потока была максимальной. Значения скорости подачи и эффективности работы созданного устройства являются максимальными среди ранее исследованных устройств.

Ключевые слова: устройство пожаротушения, распыление жидкости, огнетушащая жидкость, скорость подачи, давление распыления, весовая эффективность, эффективность работы.

Based on the selection and analysis of boundary conditions for portable fire extinguishing devices with high-speed supply of extinguishing fluid (OTG), a fire extinguishing device has been created that surpasses the existing analogues in basic characteristics. The created device has the smallest structural mass and the highest values: the consumption of OTG, the capacity of the container for OTG and the weight efficiency. In the course of the study, the dependence of the maximum theoretical water-air flow rate on the spray pressure was obtained. Based on the revealed dependencies, optimal values were established: spray pressure, water/air flow rates and their mass ratio. During the experimental study, the corresponding flow sections in the water/air mixing chamber and the geometric characteristics of the spray nozzle were found, at which the experimental water-air flow rate was maximum. The values of the feed rate and the efficiency of the created device are the maximum among the previously studied devices.

Keywords: fire extinguishing device, liquid atomization, fire extinguishing liquid, flow rate, spray pressure, weight efficiency, work efficiency.

В последние годы для мобильных устройств пожаротушения оперативного применения получили распространение способы создания потока тонкораспыленной огнетушащей жидкости (ТРВ) с помощью сжатого газа. К реализации таких способов можно отнести и ранцевые переносные устройства пожаротушения с высокоскоростной подачей огнетушащей жидкости баллонного типа (УПТ), требования к которым и методы испытаний которых отражены в ГОСТ Р 53291–2009 [1]. Кроме высокой эффективности тушения пожаров классов А, В и С, эти устройства позволяют тушить электрооборудование под напряжением электропроводящими ОТЖ, что обуславливается высокоскоростным тонкораспыленным факелом ОТЖ [2].

Всевозрастающее внимание к устройствам пожаротушения с высокоскоростной подачей ОТЖ может быть охарактеризовано как совершенствованием нормативной базы для таких устройств [1], так и внесением УПТ в нормы табельной принадлежности для 5 типов пожарных автомобилей в соответствии с приказом МЧС России № 142 от 28.03.2014. Кроме того, во многих гарнизонах ГПС МЧС России созданы подразделения быстрого реагирования, оснащенные пожарно-спасательными мотоциклами, на которых в качестве основного средства пожаротушения используются именно такие устройства пожаротушения.

В работе [3] мы сообщали о промежуточных результатах в разработке УПТ. На основании полученных данных, в частности, были сделаны выводы: эффективность устройств увеличивается при росте следующих характеристик потока ТРВ: расхода жидкости; дисперсности и скорости потока. Эти выводы согласуются с результатами других исследований.

Основной задачей настоящей работы является создание УПТ, соответствующего нормативным документам и обладающего лучшими характеристиками.

Требование коррозионной стойкости конструктивных элементов УПТ, обусловленное, в том числе, применением низкотемпературных ОТЖ, приводит к необходимости использования нержавеющей стали для баков ОТЖ. Были проведены технологические и прочностные расчеты в диапазоне планируемых давлений распыления, которые показали, что баки ОТЖ, выполненные из анизотропной нержавеющей стали, имеют лучшую весовую эффективность, чем полимерно-композитные. Применение оптимальной конструкции, формы, материала и толщины стенок корпуса позволило максимально уменьшить массу бака разрабатываемого устройства с сохранением необходимых [1] прочностных характеристик. Для других компонентов и агрегатов УПТ были проведены аналогичные исследования по выбору материалов с учетом их тепло- и коррозионной стойкости, веса и прочностных характеристик; что позволило максимально снизить конструкционную массу разрабатываемого устройства.

Конструкционная масса УПТ – m_k , кг, определяется как масса полностью укомплектованного устройства без заряда ОТЖ и газового баллона высокого давления (БВД) [1]. Весовая эффективность УПТ – η_m определяется как отношение вместимости емкости для ОТЖ – m_j , кг, к сумме конструкционной массы и вместимости емкости для ОТЖ устройства – $m_k + m_j$.

$$\eta_m = \frac{m_j}{m_k + m_j}. \quad (1)$$

Масса БВД в расчете весовой эффективности не учитывается, т. к. баллон является сменным элементом и его масса может значительно различаться в зависимости от типа, давления и производителя баллона.

Из данных, приведенных в работе [3], следует, что для разрабатываемого устройства рост максимальной теоретически достижимой скорости подачи водо-

воздушного потока симбатен увеличению давления перед выходным соплом УПТ. Зависимости теоретических скоростей – v_T

от давления распыления – P , при различных отношениях массового расхода воды к расходу воздуха – $G_{ж}/G_{г}$ приведены на рис. 1.

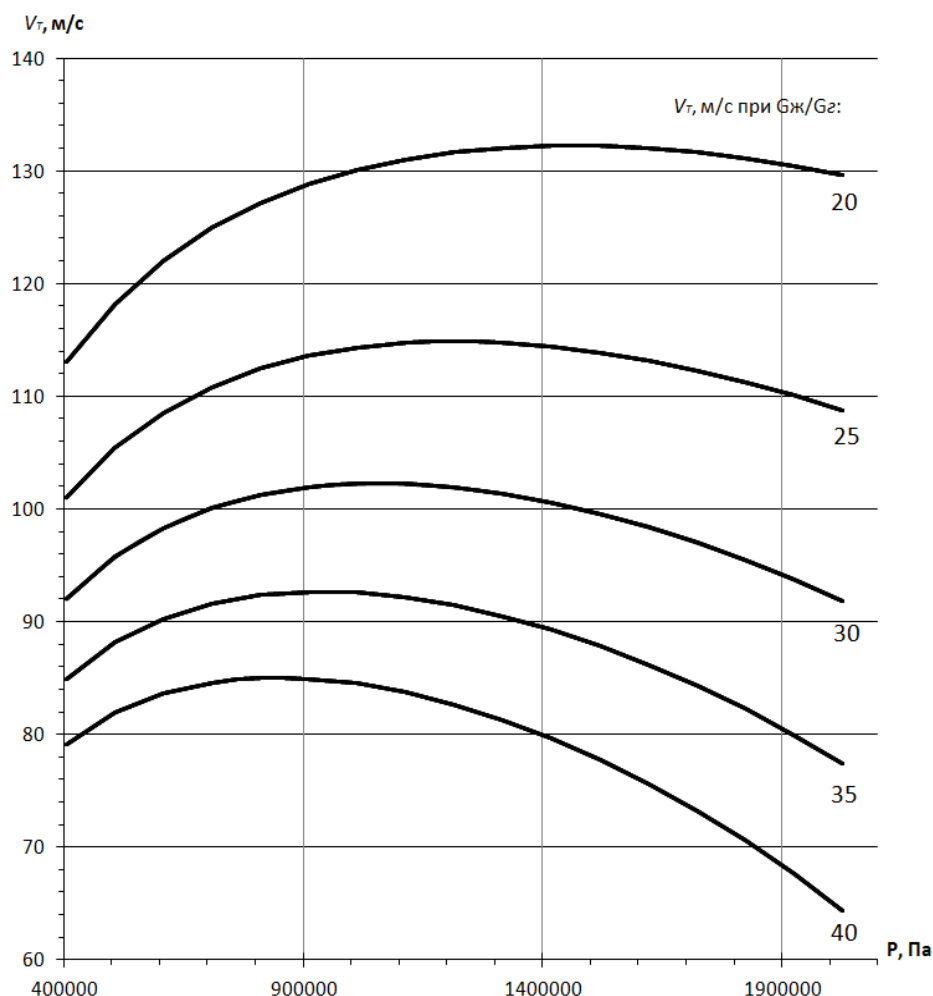


Рисунок 1. Зависимости теоретических скоростей подачи водо-воздушного потока от давления распыления, при различных отношениях массового расхода воды к расходу воздуха [3]

Из рис. 1 следует, что на зависимостях теоретической скорости подачи от давления распыления, при различных соотношениях расхода ОТЖ к расходу газа имеются выраженные максимумы, которые сдвигаются в направлении увеличения давления распыления при одновременном снижении отношения массового расхода воды к расходу воздуха.

На рис. 2 приведена зависимость отношения массового расхода воды к расходу воздуха – $G_{ж}/G_{г}$ от давления распыления – P , при котором теоретическая скорость подачи водо-воздушного потока достигает максимальных значений.

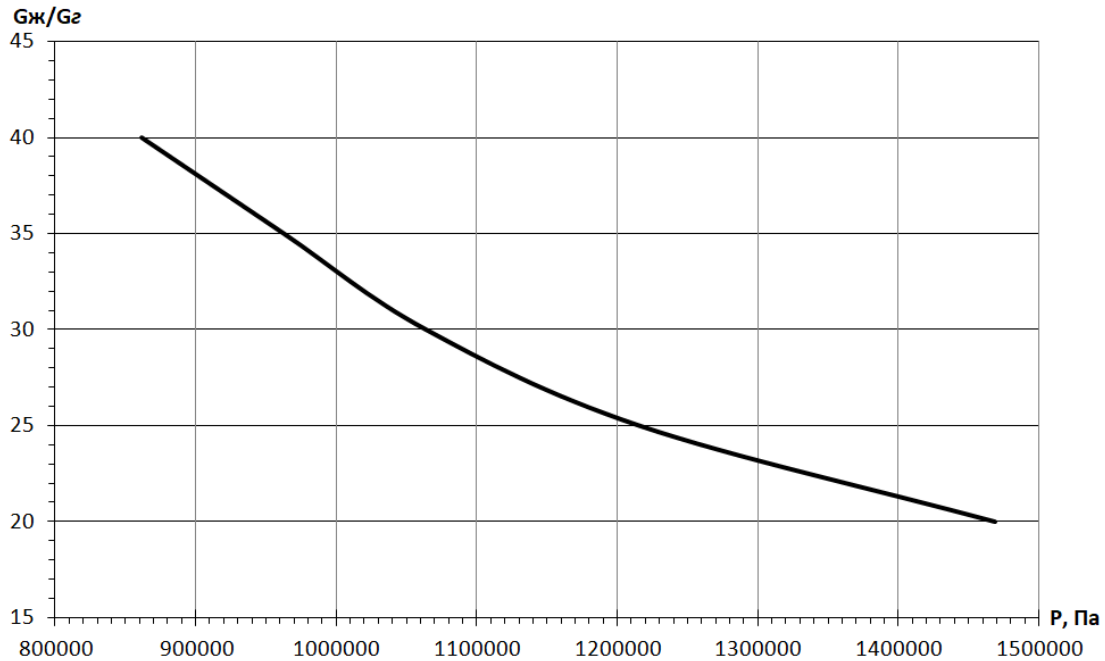


Рисунок 2. Зависимость отношения массового расхода воды к расходу воздуха от давления распыления, при котором теоретическая скорость подачи водо-воздушного потока достигает максимальных значений [3]

На основании аналитических выражений приведенных в работе [3] был построен график зависимости максимальной теоретической скорости подачи водо-воз-

душного потока – v_T от давления распыления – P (рис. 3). Каждой максимальной теоретической скорости подачи соответствует свое отношения массового расхода воды к расходу воздуха.

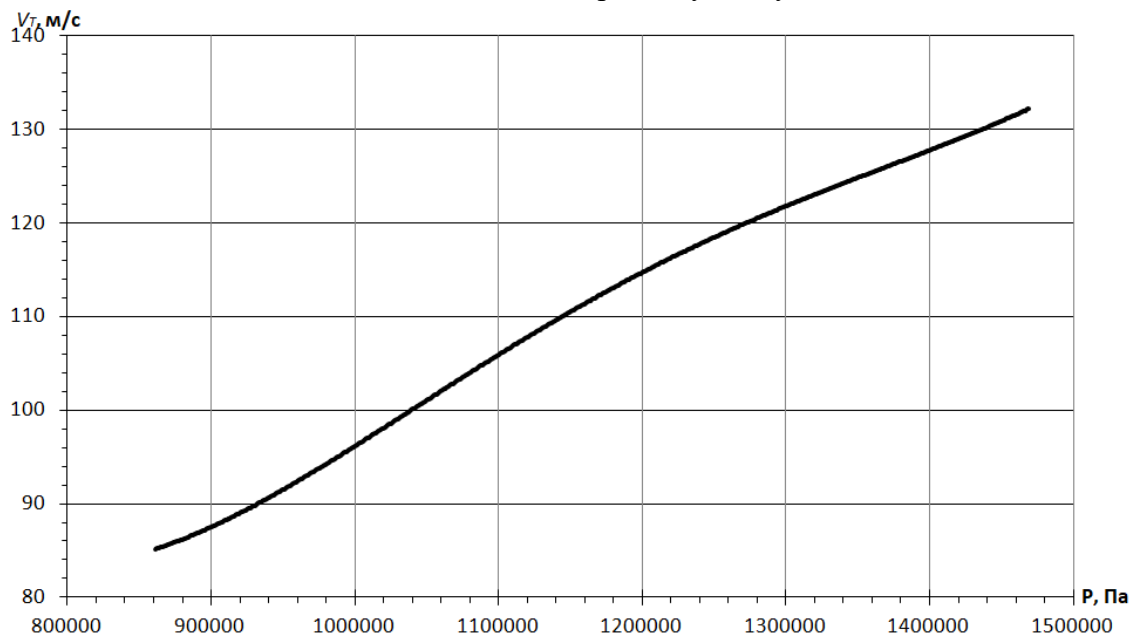


Рисунок 3. Зависимость максимальной теоретической скорости подачи водо-воздушного потока от давления распыления

Из рис. 1–3 следует, что для каждого соотношения расхода воды к расходу воздуха существует единственное значение давления распыления, при котором теоретическая скорость подачи достигает максимальных значений; и, следовательно, при условии реализации высокой эффективности работы УПТ может быть достигнута и максимально возможная экспериментальная скорость подачи ОТЖ, которая является одним из основных показателей эффективности УПТ при пожаротушении.

Рассмотрим критерии выбора граничных условий и процесс оптимизации весовых и расходных характеристик создаваемого УПТ.

В соответствии с нормативными документами для переносных УПТ граничными условиями при разработке, в частности, выступают: общая снаряженная масса УПТ не более 25 кг [1]; продолжительность подачи ОТЖ не менее 30 с [3]. Продолжительность подачи ОТЖ и скорость подачи ОТЖ, в свою очередь, определяют как максимально допустимый расход ОТЖ, так и объем запаса ОТЖ и газа для конкретного устройства.

Из данных, приведенных в работе [3], следует, что для известных УПТ объем запаса воздуха/азота для распыления ОТЖ не превышает вместимости двухлитрового БВД на 29,4 МПа. Металлокомпозитные БВД чаще всего применяются как источник давления для УПТ, т. к. именно они имеют наибольшую весовую эффективность из серийно выпускаемых БВД.

Из обязательного требования – общая снаряженная масса УПТ не должна превышать 25 кг, – следует, что для ОТЖ с плотностями близкими к плотности воды объемный запас ОТЖ определяется как разность между общей снаряженной массой и суммой конструкционной массы УПТ с массой заправленного БВД.

В результате опытно-исследовательских и инженерно-конструкторских работ, для разрабатываемого устройства удалось снизить конструкционную массу

до 6,5 кг. Масса заправленного металлокомпозитного БВД (29,4 МПа, 2 л) с композитным материалом на основе карбона составляет 2,3 кг; следовательно, объемный запас ОТЖ (или вместимость корпуса для ОТЖ) может составлять до 16,2 л включительно. Учитывая, что плотность ОТЖ может быть несколько выше плотности воды, в частности это касается низкотемпературных ОТЖ на основе воды [4], была выбрана вместимость корпуса для ОТЖ – 15 л.

Массовое отношение расхода ОТЖ к расходу воздуха/азота для запаса ОТЖ в 15 кг и запаса газа ~0,7 кг, последнее значение соответствует массе воздуха/азота в БВД (29,4 МПа, 2 л), составляет 21,4.

На основании данных, приведенных на рис. 2, определим давление распыления, при котором теоретическая скорость подачи водо-воздушного потока будет максимальной при определенном ранее отношении расхода ОТЖ к расходу воздуха/азота – 21,4. Соответствующее давление распыления составляет 1,4 МПа.

На основании данных, приведенных на рис. 3 определим максимальную теоретическую скорость подачи водо-воздушного потока, соответствующую давлению распыления в 1,4 МПа. Соответствующая теоретически достижимая скорость подачи водо-воздушного потока – 126 м/с.

Средний расход ОТЖ, при определенных ранее граничных условиях (продолжительность подачи ОТЖ 30 с и масса запаса ОТЖ 15 кг), составляет 0,5 кг/с. Соответствующий средний расход воздуха/азота при массе запаса газа 0,7 кг составляет 0,023 кг/с. Полученные значения давления распыления и расхода воздуха/азота позволили выбрать газовый редуктор, который обеспечивает требуемые характеристики.

На основании предварительных исследований были определены весовые и расходные характеристики создаваемого УПТ, которые приведены в таблице.

Таблица
Весовые и расходные характеристики устройства

Параметры и характеристики устройства	Значение
Конструкционная масса	6,5 кг
Вместимость емкости для ОТЖ	15 л
Масса заправленного металлокомпозитного БВД (29,4 МПа, 2 л)	2,3 кг
Общая снаряженная масса	23,8 кг
Весовая эффективность УПТ	0,7
Продолжительности подачи ОТЖ	30 с
Расход ОТЖ	0,5 кг/с
Расход воздуха/азота	0,023 кг/с
Массовое отношение расхода ОТЖ к расходу воздуха/азота	21,4
Давление распыления	1,4 МПа
Теоретически достижимая скорость подачи водо-воздушного потока	126 м/с

Сравнение весовых и расходных характеристик создаваемого УПТ с другими УПТ, в частности по данным, приведенным в работе [3], позволяет заключить, что создаваемое УПТ имеет наименьшую конструкционную массу и наибольшие значения расхода ОТЖ, вместимости емкости для ОТЖ и весовой эффективности.

Другим граничным условием при разработке УПТ в соответствии с [1] выступает скорость подачи ОТЖ на срезе сопла – более 60 м/с.

Скорость подачи потока ОТЖ выступает одним из важнейших критериев эффективности УПТ. Исследования проводились с помощью созданного программно-аппаратного комплекса для экспериментального определения параметров устройств с высокоскоростной подачей жидкости [5]. Основные весовые и расходные характеристики УПТ приведены в таблице. Все измерения проводились на воде и воздухе.

При заданном давлении распыления скорость подачи, расходы воды и воздуха, а также их массовое соотношение, при прочих неизменных условиях, определяются соответствующими проходными сечениями в камере смешения вода/воздух и геометрическими характеристиками распылительного сопла.

Входная часть распылительного сопла выполнена в виде коноидального конфузора, который обладает наименьшим гидравлическим сопротивлением из известных конфузоров [5]. Выходная часть сопла является цилиндрическим каналом, который может заканчиваться конусным диффузором. Диффузор выполнен с возможностью продольного перемещения относительно цилиндрического канала, которое позволяет ему выходить из соприкосновения с газожидкостным потоком. На рис. 4 приведена схема распылительного сопла с выдвинутым диффузором.

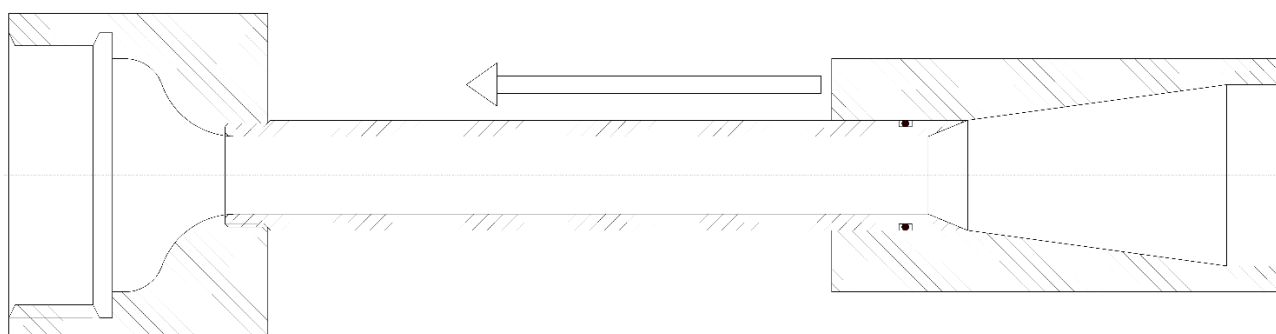


Рисунок 4. Продольный разрез распылительного сопла

При выполнении работы были исследованы распылительные сопла с различными диаметрами и длинами цилиндрического участка, также применялись диффузоры различной длины и диаметра выходного отверстия.

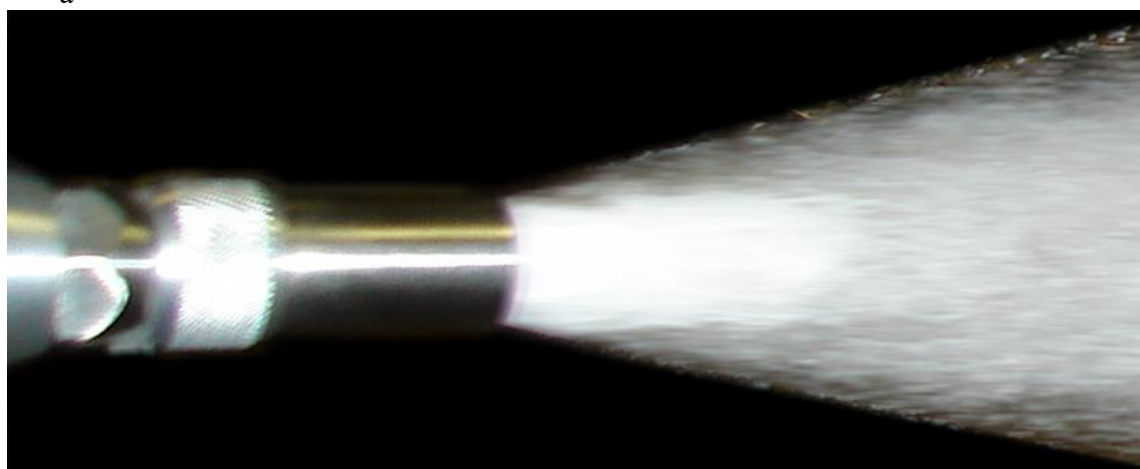
При заданном соотношении расходов вода/воздух суммарный расход потока в основном определялся диаметром цилиндрического участка сопла. Длина цилиндрического участка оказывала заметное влияние на скорость водо-воздушного потока. С увеличением длины цилиндрического участка скорость сначала увеличивалась, что объясняется улучшением условий передачи энергии расширяющегося газа распыляемой жидкости; а затем уменьшалась, что связано с увеличением сил сопротивления при росте длины сопла. Суммарный расход потока монотонно уменьшался с увеличением длины цилиндрического участка, эта зависимость также объясняется увеличением сил сопротивления с

увеличением длины сопла. Выявленные зависимости скорости и расхода потока от диаметра и длины цилиндрического участка сопла позволили найти оптимальные значения диаметра и длины сопла, при которых скорость подачи водо-воздушного потока была максимальной.

Применение выходных диффузоров в диапазоне геометрических размеров, использованных в настоящем исследовании, не оказывало существенного влияния на скорость и расход потока. Хотя влияние диффузора на скорость и расход водо-воздушного потока не было статистически значимым, применение диффузора позволяет уменьшить корневой угол потока на выходе из сопла (рис. 5); что в свою очередь приводит к уменьшению площади потока и увеличению дальности подачи. Последнее обстоятельство, наряду с возможностью быстрого переключения между режимами подачи – с диффузором и без него, существенно повышает оперативные возможности УПТ при тушении пожара.



а



б

Рисунок 5. Вид водо-воздушного потока при наличии (а) и отсутствии (б) диффузора

Уменьшение площади потока может привести к определенным ошибкам оператора при позиционировании пятна контакта ТРВ на очаге горения. При тушении с близкого расстояния, при котором эффективность тушения максимальна, диффузор следует вывести из соприкосновения с газожидкостным потоком. При необходимости проводить тушение на дальней дистанции, диффузор перемещается в переднее положение. Промежуточные положения диффузора также могут применяться.

При найденных проходных сечениях в камере смешения и соответствующих геометрических характеристиках распылительного сопла, основное внимание следует уделять снижению потерь при транспортировке ОТЖ и газа к распылительному соплу. В настоящей работе снижение этих потерь достигалось тщательным подбором материалов, размеров и проходных сечений жидкостных и газовых магистралей. Внутренние поверхности распылительного сопла были выполнены максимально гладкими.

Максимальная экспериментальная скорость подачи водо-воздушного потока для созданного УПТ составила $v_T = 91$ м/с. Эффективность работы устройств пожаротушения с высокоскоростной подачей ОТЖ – η_V может быть оценена как отношение экспериментально определенной скорости подачи ОТЖ – v_3 к теоретически достижимой – v_T :

$$\eta_V = \frac{v_3}{v_T} \quad (2)$$

Учитывая, что теоретическая скорость подачи для созданного УПТ – $v_T = 126$ м/с, эффективность работы устройства составляет $\eta_V = 0,72$. Полученные значения скорости подачи и эффективности работы УПТ являются максимальными среди УПТ, результаты исследования которых приведены в [3].

Следующим граничным условием при разработке УПТ, предназначенных для

тушения электрооборудования под напряжением, выступает ток утечки по струе ОТЖ – не более 0,5 мА [1].

В работе [2] нами показано, что ток утечки по струе электропроводящей ТРВ, при условии отсутствия непрерывной струи жидкости, является конвекционным током. Конвекционным током называется, в частности, электрический ток, созданный движущимися в газе заряженными каплями жидкости, при этом величина конвекционного тока и производное от него значение удельного заряда распыляемой жидкости могут служить параметрами, характеризующими интегральные характеристики дисперсности жидкости при ее распылении. Измерение конвекционного тока основано на определении силы постоянного тока, переносимого каплями жидкости. Увеличение дисперсности распыления приводит к пропорциональному росту удельного заряда распыляемой жидкости. Разработанный в [2] метод исследования конвекционного тока также позволяет использовать его в испытаниях устройств, предназначенных для тушения пожаров класса Е, при определении тока утечки по струе ОТЖ.

Исследования проводились с помощью созданного испытательного стенда для экспериментального определения конвекционного тока и удельного заряда распыляемой жидкости [2]. Измерения проводились при испытательном напряжении – 5 кВ. В процессе исследований установлено, что удельный заряд изменяется симбатно изменению скорости водо-воздушного потока при увеличении длины распылительного сопла. Максимальные значения конвекционного тока – $2,6 \cdot 10^{-3}$ мА и удельного заряда – $5,3 \cdot 10^{-3}$ Кл/м³ – получены при геометрических характеристиках сопла, соответствующих максимальной скорости подачи – 91 м/с. Расход воды и массовое соотношение расходов воды и воздуха при этом находились вблизи оптимальных значений ~0,5 кг/с и ~21,4 соответственно. Эти результаты подтверждают получен-

ный в других работах вывод, что дисперсность жидкости увеличивается с ростом скорости подачи ТРВ.

Как было указано выше, в рассматриваемом случае конвекционный ток соответствует току утечки по струе ОТЖ и не должен превышать 0,5 мА при подаваемом испытательном напряжении 36 кВ [1]. И хотя применение испытательного напряжения в 36 кВ представляется избыточным, т. к. известные устройства пожаротушения с высокоскоростной подачей электропроводящей ОТЖ предназначены для тушения электрооборудования под напряжением не выше 1000 В [2]; применим экстраполяцию в соответствии с законом Ома и умножим полученное при 5 кВ значение тока утечки – $2,6 \cdot 10^{-3}$ мА на отношение напряжений – $36 \text{ кВ} / 5 \text{ кВ} = 7,2$. Экстраполированный для напряжения 36 кВ ток утечки составляет 0,019 мА, что в 27 раз меньше максимально допустимого 0,5 мА. Как было показано в [2], наличие даже значительного количества добавок пенообразователя и/или неорганических

солей в водном растворе неспособно настолько существенно увеличить конвекционный ток по сравнению с водой.

На основании проведенных исследований можно заключить, что созданное УПТ позволяет проводить тушение пожаров класса Е, в том числе с применением тушащих жидкостей, обладающих высокой электропроводностью, таких как растворы пенообразователей и низкотемпературные ОТЖ на основе воды.

В соответствии с ГОСТ Р 53291–2009 [1] созданное УПТ может комплектоваться дыхательной системой. УПТ с успехом применялось для тушения различных очагов пожара в рамках межведомственного опытно-исследовательского учения «Безопасная Арктика – 2021» (рис. 6), в том числе в составе звена ГДЗС. УПТ проходит опытную эксплуатацию в подразделениях ГПС МЧС России. Полученные в ходе учений и опытной эксплуатации предложения по совершенствованию УПТ реализованы в итоговой конструкции УПТ.



Рисунок 6. Созданное УПТ, снабженное дыхательной системой, используется в составе звена ГДЗС во время учения «Безопасная Арктика – 2021»

На основе выбора и анализа установленных в нормативных документах граничных условий для переносных устройств пожаротушения с высокоскоростной подачей ОТЖ были проведены опытно-исследовательские и инженерно-конструкторские работы, которые позволили создать устройство пожаротушения, превосходящее по основным характеристикам имеющиеся аналоги.

Созданное устройство имеет наименьшую конструкционную массу и наибольшие из аналогов значения: расхода ОТЖ, вместимости емкости для ОТЖ и весовой эффективности.

В процессе исследования была получена зависимость максимальной теоретической скорости подачи водо-воздушного потока от давления распыления. Исходя из выявленных зависимостей были установлены оптимальные значения: давления распыления, расходов вода/воздух и их массового соотношения. При экспериментальном исследовании были найдены соответствующие проходные сечения в камере смешения вода/воздух и геометрические характеристики распылительного

сопла, при которых экспериментальная скорость подачи водо-воздушного потока была максимальной. Значения скорости подачи и эффективности работы созданного устройства являются максимальными среди ранее исследованных устройств.

При экспериментальном исследовании конвекционного тока, образуемого заряженными каплями воды, обнаружено, что при неизменном диаметре сопла, максимальной скорости подачи водо-воздушного потока соответствует максимальное значение удельного заряда распыляемой воды. Это подтверждает сделанный ранее вывод, что дисперсность распыляемой жидкости увеличивается с ростом скорости подачи газожидкостного потока. Полученное максимальное значение конвекционного тока во много десятков раз меньше максимально допустимого тока утечки по струе ОТЖ, что позволяет применять созданное устройство для тушения пожаров класса Е, в том числе с использованием ОТЖ, обладающих высокой электропроводностью.

Литература

1. ГОСТ Р 53291–2009. Техника пожарная. Переносные и передвижные устройства пожаротушения с высокоскоростной подачей огнетушащего вещества. Общие технические требования. Методы испытаний. М., 2009. 31 с.
2. 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.
3. Пахомов Г. Б., Дульцев С. Н., Тужиков Е. Н. Задачи создания и оптимизации двухфазных устройств пожаротушения с высокоскоростной подачей огнетушащей жидкости // Техносферная безопасность. 2021. № 2 (31). С. 94–103.
4. Пахомов Г. Б., Дульцев С. Н., Тужиков Е. Н. Исследование низкотемпературных растворов для пенного пожаротушения // Техносферная безопасность. 2020. № 3 (28). С. 101–107.
5. 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.

References

1. GOST R 53291–2009. Tekhnika pozharnaya. Perenosny`e i peredvizhny`e ustrojstva pozha-rotusheniya s vy`sokoskorostnoj podachej oignetushashhego veshhestva. Obshhie texnicheskie trebovaniya. Metody` ispy`tanij. M., 2009. 31 s.
2. Pahomov G. B., Dul'cev S. N., Tuzhikov E. N. Vliyanie harakteristik raspyleniya i svoystv oignetushashchih zhidkostej na konvekcionnyj tok obrazuemyj zaryazhennymi kaplyami // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 2 (31). S. 48–60.
3. Pahomov G. B., Tuzhikov E. N., Dul'cev S. N. Zadachi sozdaniya i optimizacii dvuhfaznyh ustrojstv pozharotusheniya s vysokoskorostnoj podachej oignetushashchej zhidkosti // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 2 (31). S. 94–103.

4. Pakhomov G. B., Duľ'cev S. N., Tuzhikov E. N. Issledovanie nizkozamerzayushchih rastvorov dlya pen-nogo pozharotusheniya // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2020. № 3 (28). S. 101–107.

5. Pakhomov G. B., Duľ'cev S. N., Tuzhikov E. N. Programmno-apparatny`j kompleks dlya e`ksperimental'nogo issledovaniya parametrov ustrojstv s vy`sokoskorostnoj podachej zhidkosti // Texnosfernaya bezopasnost`. 2020. No 2 (27). S. 107–121.