

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий
Донецкой Народной Республики

Государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» Министерства по делам
гражданской обороны, чрезвычайными ситуациями ликвидации последствий
стихийных бедствий Донецкой Народной Республики»

На правах рукописи

Ефименко Виталий Леонидович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ
С ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПРИНЦИПОМ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(по отраслям) (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2022

Работа выполнена в Государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский институт «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики» (ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»), г. Донецк.

Научный руководитель: **Мамаев Валерий Владимирович,**
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
первый заместитель директора (по научной работе)
ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР», г. Донецк

Официальные
оппоненты: **Толстых Виктор Константинович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры компьютерных технологий
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
г. Донецк

Курбацкий Евгений Васильевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры охраны
труда и аэрологии ГОУ ВПО «Донецкий
национальный технический университет», г. Донецк

Ведущая организация: **Государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Донской
государственный технический университет»,
г. Ростов-на-Дону**

Защита диссертации состоится «08» декабря 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 01.027.01 при ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» по адресу: 283048, г. Донецк, ул. Артема, 157, корп. 1, каб. 401.

Тел.: +7(856)332-78-01; +7(856)332-78-18; факс: +7(856)332-78-78

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» по адресу: 283048, г. Донецк, ул. Артема, 157, корп. 2, каб. 208, адрес сайта ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»: <http://respirator.dnmchs.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.027.01
кандидат технических наук



И.Г. Старикова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях при износе технологического оборудования и пониженном техническом уровне обслуживающего персонала наблюдается увеличение числа пожаров техногенного характера, сопровождающихся материальными убытками и человеческими жертвами.

Эффективность тушения пожара во многом зависит от оперативности развертывания сил и средств пожарных расчетов. При возникновении локальных очагов пожаров наиболее перспективным является их ликвидация с применением первичных средств пожаротушения – огнетушителей различного исполнения.

Принцип действия большинства огнетушителей заключается в создании избыточного давления воздуха (или иного газа) в сосуде (одиночные или с газовым баллоном) и при его приведении в рабочее состояние, распыленная струя огнетушащего вещества направляется на очаг пожара. Их применение является эффективным при условии непосредственного подступа оператора на расстоянии 1...5 м к очагу и весьма затруднительно тушение на большее расстояние или труднодоступные места.

Для успешного тушения пожаров следует выполнять два основных требования: как можно быстрее начать их тушение и подавать в очаг горения огнетушащие вещества требуемого состава и с необходимой интенсивностью. В последнее время для подавления очагов возгорания на начальной стадии развития применяют установки импульсного пожаротушения, в конструкцию которых входят устройства пожаротушения с дискретным и газодинамическим принципами распыления жидкости, которые позволяют эффективно вести пожарно-спасательные работы на объектах различного назначения.

Такие устройства пожаротушения обладают высокими показателями скорости импульса газокпельного потока, что позволяет эффективно подавлять очаги возгорания локального характера на достаточно большом удалении оператора от очага возгорания.

Однако в научных работах по разработкам устройств пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости недостаточно полно исследованы физические внутрикамерные процессы, происходящие в сопле, входящем в конструкцию устройства, что не позволяет в полной мере реализовать условия эффективной подачи огнетушащего вещества при ликвидации горения.

В связи с вышеизложенным, обоснование параметров устройств пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости позволит повысить эффективность тушения очагов пожаров и расширить тактические возможности подразделений аварийно-спасательных служб, что является актуальной научно-технической задачей.

Диссертация выполнена в соответствии с Планами работы Государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский институт «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики» на 2018 – 2020 гг. в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы

№ 11616036 «Разработать ранцевую установку для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой (устройство импульсного тушения пожаров)» при непосредственном участии автора в качестве ответственного исполнителя.

Степень разработанности темы. Теоретическим и экспериментальным исследованиям установок пожаротушения посвящены научные труды ведущих ученых Российской Федерации и Беларуси: Зуева Ю.В., Лепешинского И.А., Доркина Э.А., Долотказина В.И., Протасова А.Н., Иваницкого А.Г., Самойлова В.В., Лебедева А.С., Кочетова О.С., Стареевой М.О., Стареевой М.М. и других.

Разработке и совершенствованию техники и технологии газодинамического распыления жидкости посвящены труды Карпышева А.В., Душкина А.Л., Ловчинского С.Е., Агеева В.Г., Мамаева В.В., Пашковского П.С., Пефтибая Г.И., Галухина Н.А. и других.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований, способы и технические средства с газодинамическим принципом распыления жидкости имеют недостатки. Поэтому обоснование параметров устройств пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости является актуальной научно-технической задачей.

Цель и задачи исследования. Цель работы – установление закономерностей внутрикамерных газодинамических процессов для обоснования параметров устройств и повышение эффективности их тушения тонкораспыленной жидкостью локальных пожаров в начальной стадии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ ведения работ по тушению пожаров в начальной стадии и применяемых первичных средств пожаротушения;
- разработать математические модели газодинамических процессов в устройствах с дискретным и газодинамическим принципами распыления жидкости для установления влияния конструктивных параметров на эффективность доставки огнетушащего вещества;
- провести сравнительный анализ газодинамических характеристик устройств с дискретным и газодинамическим принципами распылением жидкости для установления их эффективности;
- провести анализ технических решений и разработать конструктивную схему устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости;
- выполнить экспериментальные исследования и оценку эффективности разработанного экспериментального образца устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости;
- разработать техническую документацию на ранцевую установку для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой, изготовить опытный образец;
- разработать методические рекомендации по применению ранцевой установки для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой.

Объект исследования – внутрикамерные газодинамические процессы, протекающие в сопле устройства пожаротушения.

Предмет исследования – формирование струи тонкораспыленной жидкости в процессе подачи в очаг пожара из сопла устройства пожаротушения

в зависимости от геометрических и гидродинамических параметров газокапельных потоков.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что автором:

1. Разработана математическая модель динамических процессов в стволе устройства пожаротушения с дискретным формированием потока жидкости на срезе насадка, отличающаяся от известных тем, что учитывает особенности протекания термодинамического процесса в газовой и жидкостной камерах, а также влияние инерционных потерь давления и местного сопротивления при внезапном сужении насадка.

2. Получено нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее процесс движения жидкости в стволе устройства, отличающееся от известных тем, что сопротивление резинового насадка рассматривалось как сопротивление отверстия в тонкой стенке со скругленной входной кромкой, при допущении об адиабатическом процессе расширения газа в газовой и жидкостной камерах, что позволяет упростить численные расчеты гидродинамических параметров.

3. Впервые разработана математическая модель движения газокапельного потока в сопле устройства с газодинамическим принципом распыления жидкости, в которой предложена новая алгебраическая функция давления, удовлетворяющая плавности изменения давления по длине сопла, наличию максимума в начале и минимума на его срезе, что позволило выполнить численные исследования, получить рациональный профиль сопла и повысить эффективность тушения пожара.

4. Впервые научно обоснован геометрический профиль трехкамерного сопла устройства с газодинамическим принципом распыления жидкости, который учитывает влияние изотермического двухфазного газокапельного потока на внутрикамерные процессы.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны математические модели динамических процессов в стволе устройства пожаротушения с дискретным и газодинамическим принципами формирования газокапельного потока, учитывающие влияние потерь на ускорение жидкости и местное сопротивление, а также взаимосвязь конструктивных и газодинамических параметров позволяет научно обосновывать технические требования на этапе проектирования данного устройства, определить влияние конструктивных параметров на основные характеристики: скорость струи, расход жидкости, расход газа, время импульса, реактивную силу.

2. На основании рассчитанного геометрического профиля сопла разработана техническая документация и изготовлен опытный образец устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости, который использован в ранцевой установке, успешно прошедшая предварительные и приемочные испытания, подтвердившие обоснованность параметров, а также рекомендована к внедрению в пожарно-спасательные подразделения МЧС ДНР.

3. Результаты диссертационной работы получили внедрение в научный и учебный процессы ГБОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС ДНР» при проведении занятий по дисциплинам «Профессиональная подготовка пожарного»

и «Пожарная и аварийно-спасательная техника», а также используются ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области пожарной и промышленной безопасности.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовался комплексный подход, содержащий анализ и обобщение научных результатов ранее полученных другими авторами; методы математической физики; математическое моделирование и численное решение задачи процессов в сопле устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости; экспериментальные исследования влияния конструктивных и эксплуатационных параметров сопле устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости с последующей математической обработкой результатов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели динамических процессов в стволе устройства пожаротушения с дискретным формированием газокапельного потока на срезе насадка при внезапном сужении насадка и скругленной входной кромкой, что позволяет установить взаимосвязь конструктивных и газодинамических параметров и научно обосновать технические требования при проектировании данного устройства.

2. Математическая модель динамических процессов в сопле устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости и плавностью изменения давления по длине сопла, что позволило получить рациональный профиль сопла и повысить эффективность тушения очагов пожара.

3. Получено эмпирическое выражение в виде алгебраической функции третьего порядка зависимости скорости газокапельного потока от дальности его подачи, что позволяет определить максимальное расстояние, на котором осуществляется эффективное тушение пожара.

Степень достоверности и апробация результатов диссертации подтверждается: корректным использованием основных положений применяемых методов Сен-Венана и Ванцеля, Бернулли, Кориолиса, Рунге-Кутты, Клапейрона, закона Бойля-Мариотта для моделирования гидродинамических процессов газокапельных потоков, расчетов параметров, результатами экспериментальных испытаний и реального применения, подтверждённых соответствующими актами.

Результаты диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на заседаниях Ученого совета и его секций «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» НИИГД «Респиратор» (2018 – 2022 гг.).

Основные положения и отдельные этапы диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на 7 научных конференциях и форумах, проводимых в ДНР, Российской Федерации:

ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР: Республиканская научная конференция «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (Донецк, 05.12.2018); III Республиканская научная конференция «Современное состояние и перспективы дальнейшего развития системы гражданской обороны Донецкой Народной Республики» (Донецк, 17.10.2019); III Республиканская научно-техническая конференция «Пожарная безопасность объектов республики»

(Донецк, 28.03.2021); IV Республиканской научной конференции «Современное состояние и перспективы дальнейшего развития системы гражданской обороны Донецкой Народной Республики» (Донецк, 19.10.2021); IV Республиканской научно-технической конференции «Пожарная безопасность объектов Республики», приуроченная ко Дню пожарной охраны (Донецк, 28.04.2022);

ФГБОУ ВО Воронежский Государственный технический университет VII Международная научно-практическая конференция «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Россия, г. Воронеж, 24-25.02.2022);

СПИ (филиал) ФГБОУ ВО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова II Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы науки и техники», посвященной 70-летию ИМИ-ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО ИжГТУ им. М.Т. Калашникова (Россия, г. Сарапул, 19-21.05.2022).

Личный вклад соискателя состоит в формировании целей и задач исследований, научных положений и выводов; проведении теоретических исследований газодинамических процессов в устройствах с дискретным и газодинамическим принципами распыления жидкости для установления влияния конструктивных параметров на эффективность доставки огнетушащего вещества; проведения сравнительного анализа газодинамических характеристик устройств с дискретным и газодинамическим принципами распылением жидкости для установления их эффективности; проведения анализа технических решений и разработке конструктивной схемы устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости; выполнения экспериментальных исследований и оценке эффективности разработанного экспериментального образца устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости; разработке технической документации на ранцевую установку для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой и изготовлении опытного образца; разработке методических рекомендаций по применению ранцевой установки для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 16 научных и учебно-методических работах, в том числе: семь статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях ВАК МОН ДНР; одна статья опубликована в рецензируемом научном издании ВАК МНВО РФ; семь статей – в сборниках материалов научных конференций, входящих в наукометрическую базу РИНЦ, одна работа в виде методических рекомендаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, основной части (из четырех разделов), заключения (с основными выводами), списка литературы из 131 наименований и 5 приложений. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 41 рисунок и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, и их новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Первый раздел посвящен анализу ведения работ по тушению пожаров в начальной стадии и применяемых первичных средств пожаротушения; представлен обзор, анализ, особенности конструкций и применение существующих установок импульсного пожаротушения; проведен анализ выполненных исследований по разработке устройств, входящих в конструкцию установок импульсного пожаротушения.

При применении существующих устройств, некоторые пожары не были потушены и наблюдались повторное воспламенение. Это объясняется тем, что недостаточно полно исследованы физические внутрикамерные процессы в сопле устройства УИПТ, которые не позволяют в полной мере реализовать условия эффективной подачи огнетушащего вещества для ликвидации горения.

Принимая во внимание очевидный интерес к этому направлению исследований, можно сделать вывод о его актуальности и перспективах использования устройств с газодинамическим принципом распыления жидкости для ликвидации пожаров, сформирована цель работы и задачи исследований

Во втором разделе рассматриваются конструктивные особенности и принцип действия устройств с дискретным и газодинамическим принципами распыления жидкости. На основании результатов анализа физических процессов в сопле устройств пожаротушения установлены причины неоднозначности влияния тонкораспыленного капельного потока на эффективность тушения пожара, заключающиеся в существенно разных режимах взаимодействия распыленной воды с конвективными восходящими тепловыми потоками горящего материала. Для определения эффективности применения устройства проведены исследования особенностей конструктивных решений, исследованы физические процессы и разработаны математические модели физических процессов при принятых следующих допущениях:

- влиянием изменения площади сечения клапана при его открывании на динамические процессы пренебрегаем ввиду быстрого его открывания;
- граница раздела фаз (газ и жидкость) – плоская (скорость течения жидкости по сечению ствола одинакова);
- термодинамические процессы в газовых полостях ствола происходят без теплообмена (за счет большой скорости вытеснения жидкости), т.е. адиабатические с показателем адиабаты $k = 1,4$;
- стенки ствола абсолютно жесткие.

Работа устройства с дискретной подачей связана с периодическим наполнением и опорожнением сжатым воздухом полостей постоянного и переменного объема, при этом массовое количество воздуха в них непрерывно изменяется. Из-за этого закономерности, связывающие между собой параметры состояния воздуха в ходе термодинамических процессов, нарушаются. Поэтому процессы в полостях с переменной массой газа описываются системой уравнений

адиабат в дифференциальной форме, полученные на основе уравнений энергетического баланса (уравнения сохранения энергии):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_1}{d\tau} = -kp_1 \frac{1}{m_1} \frac{dm_1}{d\tau}; \\ \frac{dp_2}{d\tau} = kp_2 \left(\frac{1}{m_2} \frac{dm_2}{d\tau} - \frac{1}{v_2} \frac{dv_2}{d\tau} \right); \\ \frac{dm_2}{d\tau} = -\mu f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{m_1}{v_1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}; \\ \frac{dm_1}{d\tau} = -\frac{dm_2}{d\tau}; \\ v_n^2 = \frac{2\varphi^2}{1 + \varphi^2 \xi \left(1 - \frac{S}{A} \right)} \left(\frac{1}{\rho} p_2 + \frac{Al_{ж} - v_2}{A^2} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2} - \frac{1}{\rho} p_a \right); \\ \frac{dv_2}{d\tau} = -\mu S \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{p_2 - \xi \left(1 - \frac{S}{A} \right) \rho v_n^2} + \rho \frac{Al_{ж} - v_2}{A^2} \frac{d^2 v_2}{d\tau^2} - p_a}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где p_1 – давление в газовой полости, Па;

m_1 – масса газа в газовой полости, кг;

k – показатель адиабаты;

p_2 – давление в газовой полости переменного объема, Па;

m_2 – масса газа в газовой полости переменного объема, кг;

v_2 – переменный объем газовой полости, м³.

f – площадь сечения клапана, м².

μ – коэффициент расхода насадка;

S – площадь сечения насадка, м²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

Δp – перепад давления на насадке, Па.

p_a – давление окружающей среды, Па.

ξ – безразмерный коэффициент, зависящий от соотношения площадей ствола и насадка (справочное значение);

A – площадь сечения ствола, м²;

v_n – скорость жидкости в насадке, м/с.

$l_{ж}$ – длина жидкостной полости, м;

Начальные условия системы (1): $p_1(0) = p_{10}$; $p_2(0) = p_{20}$; $m_2(0) = m_{20}$; $v_2(0) = v_{20}$; $v_2'(0) = v_{21}$. Начальное значение массы газа $m_1(0)$ в полости постоянного объема представим, используя уравнение состояния идеального газа:

$$m_1(0) = \frac{p_1(0)v_1}{RT}, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

T – температура газа, К.

Численные значения начальных условий принимают, следующие значения: $p_{10} = 2,6$ МПа; $p_{20} = 0$; $m_1(0) = 0,0257$ кг; $m_{20} = 0$; $v_{20} = 0$; $v_{21} = 0$.

Время импульса $\tau_{\text{и}}$ рассчитываем при условии опорожнения жидкостной полости (заполнения ее вытесняемым газом), т.е. при условии $v_2(\tau_{\text{и}}) = v_{\text{ж}}$, где $v_{\text{ж}}$ – объем жидкостной полости, м^3 .

Компьютерная реализация предложенного дифференциального уравнения методом Рунге – Кутты четвертого порядка позволила получить следующие параметры: массовый расход жидкости (Рисунок 1), скорость жидкости на срезе насадка (Рисунок 2), реактивную силу истекающей струи (Рисунок 3), время импульса.

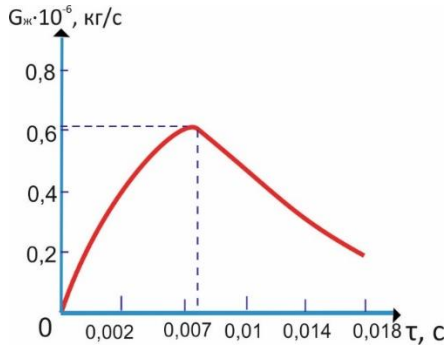


Рисунок 1 – Массовый расход жидкости

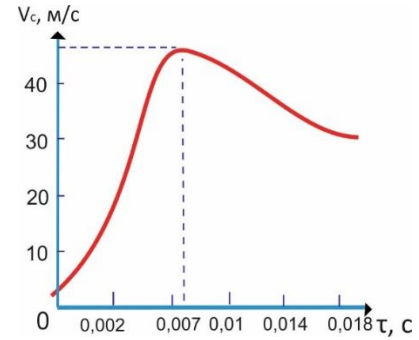


Рисунок 2 – Скорость жидкости на срезе насадка

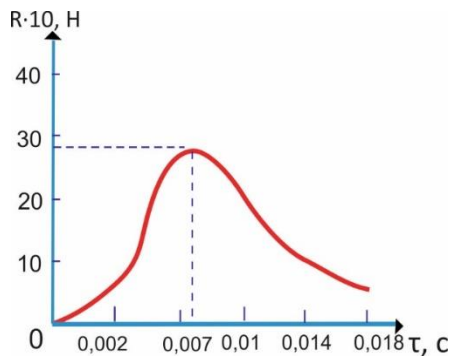


Рисунок 3 – Реактивная сила истекающей струи

Ввиду того что математическая модель (1) является достаточно сложная, поэтому для упрощения расчетов основных параметров динамического процесса движения жидкости в устройстве разработана математическая модель (3) на основе допущения о незначительном перепаде давления (из-за большого проходного сечения) на быстродействующем клапане, что позволило получить математическую модель движения жидкости в виде одного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\rho l_{\text{ж}}^2 (1 - y) \frac{d^2 y}{d\tau^2} + \frac{\rho}{2} \left(\frac{\alpha_2}{a^2 \varepsilon^2} + \frac{1}{a^2 \mu^2} - \alpha_1 \right) l_{\text{ж}}^2 \left(\frac{dy}{d\tau} \right)^2 - p_0 \left(\frac{l_{\Gamma}}{l_{\Gamma} + l_{\text{ж}} y} \right)^k + p_a = 0. \quad (3)$$

Компьютерная реализация методом Рунге – Кутты четвертого порядка позволила получить следующие параметры: график зависимости относительной координаты положения от времени (Рисунок 4), скорость жидкости в сопле

(Рисунок 5), ускорение жидкости в сопле (Рисунок 6), массовый расход жидкости (Рисунок 7), скорость жидкости на срезе сопла (Рисунок 8), реактивную силу истекающей струи (Рисунок 9), время импульса.

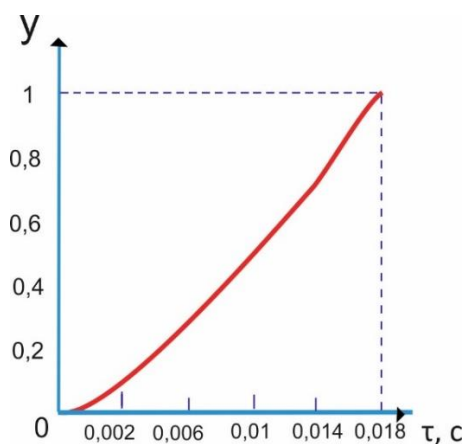


Рисунок 4 – Зависимость относительной координаты положения от времени

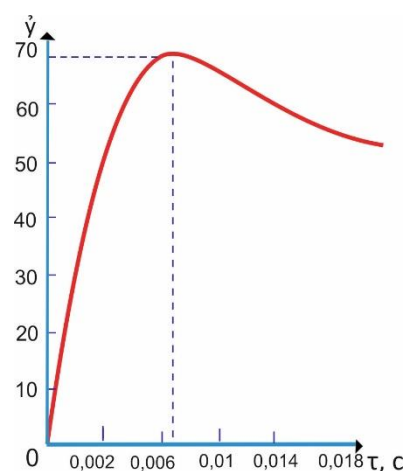


Рисунок 5 – Скорость жидкости в стволе

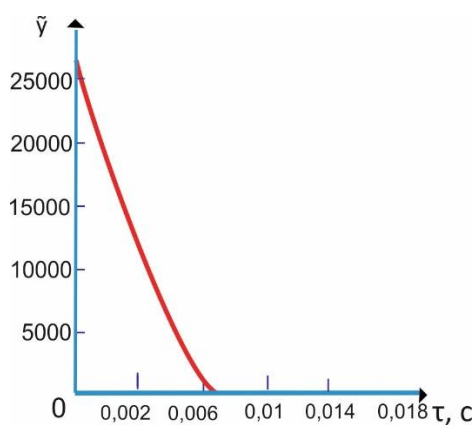


Рисунок 6 – Ускорение жидкости в стволе

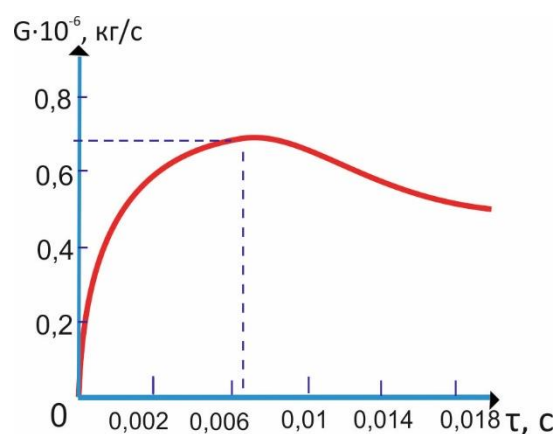


Рисунок 7 – Массовый расход жидкости

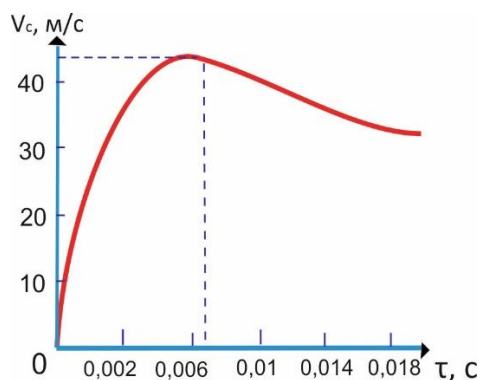


Рисунок 8 – Скорость жидкости на срезе насадки

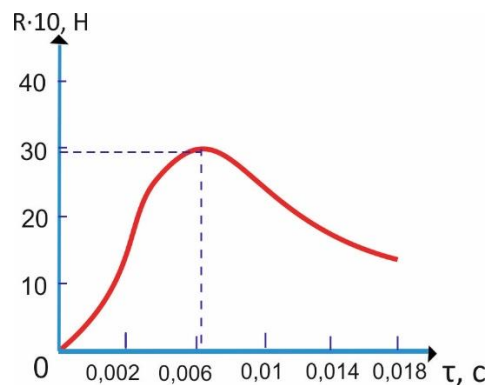


Рисунок 9 – Реактивная сила истекающей струи

При решении математических моделей (1) и (2) полученные параметры существенно не отличаются друг от друга, что подтверждает правильность

разработанных математических моделей. Таким образом установлены основные динамические характеристики импульсного истечения жидкости из устройства УИПТ с дискретной подачей огнетушащего вещества. При дискретной подаче огнетушащего вещества УИПТ на пожарного действует большой импульс силы отдачи ствола равная около 300 Н.

В устройствах с газодинамическим принципом распыления жидкости наиболее ответственной частью является двухфазное сужающееся-расширяющееся сопло, в котором за счет уменьшения энтальпии увеличивается кинетическая энергия газовой и капельных фаз. Синтез профиля газокapельного сопла, представленный на Рисунке 7, является сложной и неоднозначной задачей, для решения которой в общем случае используют уравнения движения, теплообмена, закона сохранения энергии, уравнения Клапейрона, закона неразрывности потока, записанные для газовой и капельной составляющей двухфазного потока.

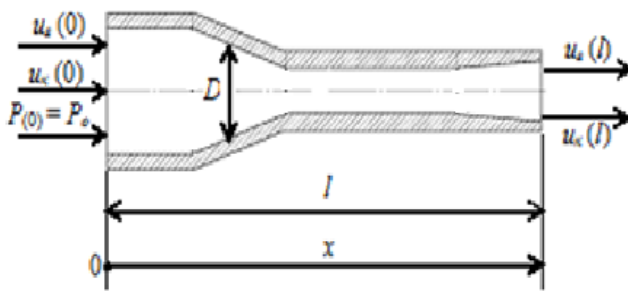


Рисунок 7 – Профиль газокapельного сопла

В устройствах с газодинамическим принципом распыления жидкости диспергация воды на капли происходит внутри сопла с последующим разгоном капельного потока и его выбросом в атмосферу. Длина сопла и его геометрический профиль влияют на характеристики газокapельного потока, следовательно, и на эффективность тушения пожара.

Уравнения массового расхода для газовой и капельной фаз газокapельного сопла имеет вид:

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} f_{\Gamma} u_{\Gamma} = \text{const}; \quad (3)$$

$$G_{\kappa} = \rho_{\kappa} f_{\kappa} u_{\kappa} = \text{const}, \quad (4)$$

где G_{Γ} – массовый расход газовой фазы, кг/с;

ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³;

f_{Γ} – площадь сечения газового потока, м²;

u_{Γ} – скорость газа, м/с;

G_{κ} – массовый расход капельной фазы, кг/с;

ρ_{κ} – плотность капли, кг/м³;

f_{κ} – площадь сечения капельного потока, м²;

u_{κ} – скорость капли, м/с.

Сумма f_Γ и f_k представляет собой площадь поперечного сечения сопла F , м², то есть:

$$f_\Gamma + f_k = F. \quad (5)$$

Так как

$$F = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (6)$$

где D – диаметр сопла, м.

то с учетом (3) – (5), получена формула для переменного диаметра сопла:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{G_\Gamma}{\rho_\Gamma u_\Gamma} + \frac{G_k}{\rho_k u_k} \right)}. \quad (7)$$

Неизвестные функции ρ_Γ , u_Γ , u_k , входящие в (7) нашли используя уравнения движения капельного потока и уравнения конвективного теплообмена между каплями и газом внутри сопла:

$$G_k \frac{du_k}{dx} = -f_k \frac{dP}{dx} + \frac{f_k}{V_k} \frac{C_x \pi d_k^2 \rho_\Gamma (u_\Gamma - u_k) |u_\Gamma - u_k|}{8}, \quad (8)$$

$$G_k \frac{di_k}{dx} = \frac{6 f_\Gamma}{d_k} \alpha (T_\Gamma - T_k); \quad (9)$$

$$G_\Gamma \frac{di_\Gamma}{dx} = -\frac{6 f_\Gamma}{d_k} \alpha (T_\Gamma - T_k); \quad (10)$$

где P – давление, Па;

V_k – объем капли, м³;

$C_x = \frac{24}{Re_k} + \frac{4,4}{\sqrt{Re_k}} + 0,32$ – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$Re_k = \frac{(u_\Gamma - u_k) d_k \rho_\Gamma}{\mu_\Gamma}$ – число Рейнольдса;

d_k – диаметр капли, м;

μ_Γ – коэффициент динамической вязкости газа, Па с;

i_k, i_Γ – удельные энтальпии капель и газа, Дж/кг;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);

T_Γ, T_k – температуры газа и капель, К.

Плотность газа определили из уравнения Клапейрона:

$$\rho_r = \frac{P}{R_r T_r}; \quad (11)$$

где R_r – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К) (для воздуха равна 287 Дж/(кг·К)).

Закон сохранения полной энергии двухфазного потока записанный в виде суммы кинетической энергии и теплосодержания (энтальпии) каждой из фаз имеет вид:

$$c_p T_r + \frac{u_r^2}{2} + g \left(c T_k + \frac{u_k^2}{2} \right) = const; \quad (12)$$

где c_p и c – теплоемкость газа при постоянном давлении и теплоемкость вещества капли (воды), Дж/(кг·К);

$g = \frac{G_k}{G_r}$ – коэффициент загрузки двухфазного потока каплями.

В уравнениях (9 – 12) используются переменные величины T_r и T_k .

Для оценки влияния T_r , T_k на систему уравнений определили термодинамический процесс, протекающий в газокапельном сопле. Для этого вычислили показатель k_d адиабаты (изоэнтропы) двухфазного потока, преобразовав формулу для k_d в выражение:

$$k_d = 1 + \frac{1}{1 + g \frac{c}{c_v}} \cdot \frac{R}{c_v} \quad (13)$$

где c_v – теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К).

Численные значения физических величин, входящих в выражение (14) для двухфазного воздушно-капельного потока следующие: $c_v = 718$ Дж/(кг·К), $c = 4183$ Дж/(кг·К). Коэффициент загрузки потока каплями имеет оптимальный диапазон значений $g = 30 - 40$, при котором капельный поток имеет максимальную дальноточность. Поэтому принимаем $g = 40$. Подставив численные значения физических величин в формулу (13), получаем $k_d = 1$. Если показатель адиабаты $k_d=1$, то термодинамический процесс в газокапельном сопле с большой достоверностью – изотермический. Это означает, что температура газа и капель не изменяется, то есть равна температуре T , К, окружающей среды:

$$T_r = T_k = T = const,$$

а уравнения (8 – 10) можно исключить из общей системы уравнений. Дифференцируя уравнение (12) по переменной x и учитывая изотермичность процесса, получили:

$$u_{\Gamma} \frac{du_{\Gamma}}{dx} + g u_{\kappa} \frac{du_{\kappa}}{dx} = 0. \quad (14)$$

Выражая объем капли через ее диаметр, и с учетом того, что $(u_{\Gamma} - u_{\kappa}) |u_{\Gamma} - u_{\kappa}| = (u_{\Gamma} - u_{\kappa})^2$ (поскольку всегда выполняется неравенство $u_{\Gamma} \geq u_{\kappa}$) получено выражение из уравнения (8)

$$u_{\kappa} \frac{du_{\kappa}}{dx} = -\frac{1}{\rho_{\kappa}} \frac{dP}{dx} + \frac{3}{4} C_x \frac{1}{d} \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\kappa}} (u_{\Gamma} - u_{\kappa})^2. \quad (15)$$

Функция давления $P(x)$ должна удовлетворять следующим требованиям:

- плавно изменяться по всей длине сопла;
- иметь максимум P_0 в начале сопла и минимум P_a – атмосферное давление на срезе сопла;

- производная $\frac{dP}{dx}$ в точках экстремумов должна быть равна нулю.

Для задания функции давления принята алгебраическая функция $y = z^4 - 2z^2$ плавно изменяющаяся и имеющая два локальных экстремума на концах отрезка $[0,1]$. Преобразованием графика этой функции на указанном отрезке путем масштабирования, сдвига вдоль координатной оси OY , введением относительной переменной $0 \leq \frac{x}{l} \leq 1$ получена функция давления:

$$P = P_0 \left\{ \left(1 - \frac{P_a}{P_0} \right) \left[\left(\frac{x}{l} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right] + 1 \right\}, \quad (16)$$

где l – длина сопла, м,

полностью удовлетворяющая вышеперечисленным требованиям, так как

$$P(x=0) = P_0, \quad P(x=l) = P_a, \quad P'(x=0) = P'(x=l) = 0.$$

Уравнения (7), (11), (14) – (16) образуют систему уравнений, позволяющую определить профиль газокapельного сопла:

$$\begin{cases} u_{\Gamma} \frac{du_{\Gamma}}{dx} + g u_{\kappa} \frac{du_{\kappa}}{dx} = 0; \\ u_{\kappa} \frac{du_{\kappa}}{dx} = -\frac{1}{\rho_{\kappa}} \frac{dP}{dx} + \frac{3}{4} C_x \frac{1}{d} \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\kappa}} (u_{\Gamma} - u_{\kappa})^2; \\ \rho_{\Gamma} = \frac{P}{R T}; \\ P = P_0 \left\{ \left(1 - \frac{P_a}{P_0} \right) \left[\left(\frac{x}{l} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right] + 1 \right\}; \\ D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{G_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} u_{\Gamma}} + \frac{G_{\kappa}}{\rho_{\kappa} u_{\kappa}} \right)}. \end{cases} \quad (17)$$

Первые четыре уравнения системы (17) позволяют получить функции ρ_g , u_g , u_k подставляя которые в последнее уравнение системы (17) получаем зависимость диаметра сопла от его длины (геометрический профиль).

Предложенные уравнения краевой задачи (17) являются нелинейными уравнениями математической физики, и их реализация требует применения компьютерных методов. При решении дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты получены геометрические показатели профиля сопла.

Графики изменения скорости газа и капли вдоль сопла, а также зависимости давления и плотности газа от длины сопла представлены на Рисунках 8, 9.

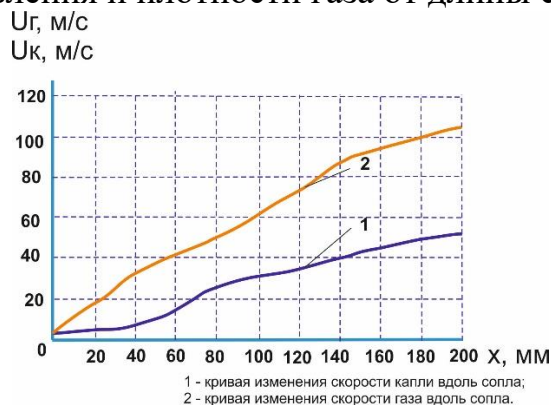


Рисунок 8 – График изменения скорости газа и капли вдоль сопла 200 мм

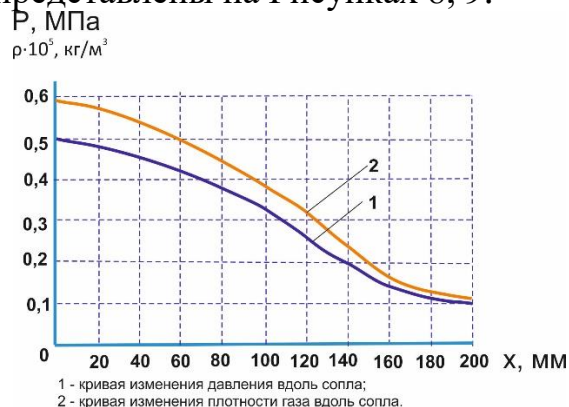


Рисунок 9 – График зависимости давления и плотности газа от длины сопла 200 мм

Система уравнений позволяет определить конструктивные параметры сопла, физические и энергетические характеристики процессов, протекающих на участках сопла (Таблица 1 и Рисунок 10).

Таблица 1 – Расчетные характеристики

Параметр	Координата точки, x, мм										
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Давление P, МПа	0,50	0,49	0,46	0,43	0,38	0,32	0,26	0,20	0,15	0,11	0,10
Плотность $\rho \cdot 10^5$, кг/м ³	0,595	0,585	0,557	0,513	0,455	0,386	0,314	0,243	0,181	0,136	0,119
Скорость газа U_g , м/с	5	19	28	40	49	61	72	86	96	100	102
Скорость капли U_k , м/с	5	6	7	13	26	31	35	40	45	50	53
Диаметр сопла D, мм	21,71	11,23	9,48	8,27	7,93	7,71	7,88	8,19	8,99	10,15	10,75



Рисунок 10 – Геометрический профиль сопла

Реактивную силу отдачи устройства с газодинамическим принципом находим по формуле:

$$R = G_{\Gamma} \cdot U_{\Gamma} + G_{\kappa} \cdot U_{\kappa} \quad (18)$$

При длине сопла 200 мм: $U_{\Gamma} = 102$ м/с; $U_{\kappa} = 53$ м/с; $G_{\Gamma} = 11 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $G_{\kappa} = 0,38$ кг/с.

$$R = 11 \cdot 10^{-3} \cdot 102 + 0,38 \cdot 53 = 21,3 \text{ Н}$$

Проведенные числовые расчеты устройств с дискретной и газодинамическим принципами распыления жидкости, представленные в таблице 2, позволяют провести сравнительный анализ основных динамических параметров.

Таблица 2 – Сравнительные параметры устройств с дискретным и газодинамическим принципом распыления жидкости

Принцип распыления	Параметры		
	Скорость жидкости, м/с	Расход воды, кг/с	Реактивная сила отдачи, Н
Газодинамический	53	0,38	21,3
Дискретный	46	0,2 (за полный цикл)	300

Из таблицы 2 видно, что скорость жидкости на срезе ствола и среднемассовый расход воды за полный цикл в устройстве с газодинамическим принципом распыления больше чем в устройстве с дискретной подачей жидкости, а реактивная сила отдачи – меньше более чем на порядок. Кроме того, конструктивное исполнение ствола устройства с дискретной подачей жидкости является сложным из-за специальной конструкции быстродействующего клапана, необходимостью комплектования двухступенчатым редукционным клапаном. Учитывая негативное воздействие реактивной силы отдачи (300Н) на пожарного (потеря устойчивости, вероятность получения травмы) и результаты сравнительного анализа основных динамических характеристик обосновано принято решение, что наиболее перспективным направлением разработки является устройство с газодинамическим принципом распыления жидкости.

В третьем разделе изложена методика и результаты экспериментальных исследований. Для установления соответствия конструктивных параметров выполнены экспериментальные исследования по определению дальности и скорости газокapelного потока, диаметра капель и реактивной силы отдачи устройства.

Результаты проведенных испытаний на дальность подачи газокapelного потока подтвердили соответствие требований технического задания и конструкторской документации. Установлено, что наибольшая дальность газокapelного потока из устройства пожаротушения с соплом длиной 20 см. составила 17 м.

В устройствах пожаротушения диаметр капли определяют на расстоянии 1 м от среза сопла. В данном случае из-за высокой компактности газокapelной струи

на начальном участке длиной 1 м не удалось получить осаждения капель на подложку. В связи с этим отбор капель проводился на расстоянии 3, 6 и 9 м от среза сопла. Осаждение капель осуществлялось на тонкую оптически прозрачную поверхность толщиной не более 1 мм. Для увеличения угла смачивания капли поверхность осаждения покрывали парафином и полировали до оптической прозрачности. В результате этого капли сохраняли сферическую форму и не растекались по поверхности плоскости осаждения. Для оптической контрастности пожаротушающее вещество подкрашивали раствором бриллиантовой зелени из расчета 30 мл бриллиантовой зелени на 1 л воды. Результаты экспериментального исследования диаметра капель представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований диаметра капель

Расстояние фиксации капли, м	Диаметр капли, мкм	Отношение к осажженным каплям, %	Средний диаметр капли, мкм	Согласно требованиям НПБ 316-2003, мкм	Соответствие НПБ 316-2003
6	300	10	150	не более 150	соответств.
	200	70			
	100	20			
9	300	5	145	не более 150	соответств.
	200	70			
	100	25			

Результаты исследования показали, что при установке на устройство пожаротушения сопел разной длины 15, 20, 25, 30 см реактивная сила отдачи устройство пожаротушения при подачи газокapельного потока показала допустимые значения не более 150 Н.

Аппроксимация эмпирических данных моделирующей их аналитической функцией позволила получить следующее выражение:

$$V = 0,015L^3 + 0,1236L^2 - 5,4632L + 50,175 \quad (19)$$

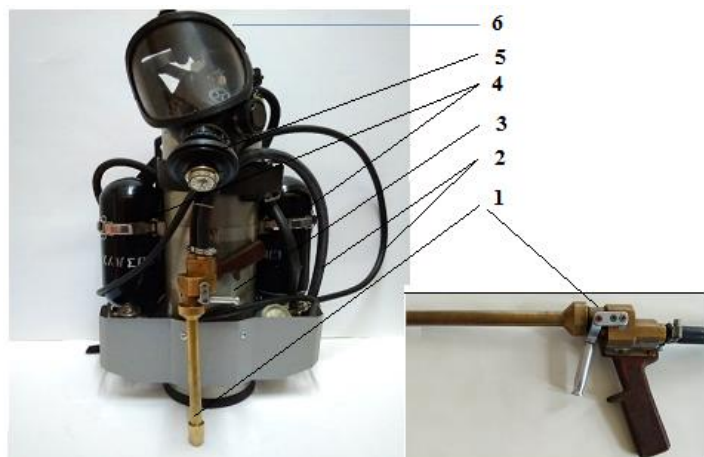
при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,994$, что соответствует индексу корреляции $R = \sqrt{R^2}$. При $R^2 = 0,994$ получаем $R = 0,9997$. Таким образом:

- фактор «дальность подачи газокapельного потока» объясняет до 99,4 % всех возможных факторов, действующих на скорость газокapельного потока;
- теснота выбранного согласно выражению (19) типа связи между фактором «дальность подачи газокapельного потока» и исследуемой переменной (скоростью газокapельного потока) равна 99,97 %.

Экспериментальные исследования по определению скорости газокapельного потока на срезе сопла устройства пожаротушения показывают удовлетворительную сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований, максимальная погрешность которых не превышает 12,7 %.

В четвертом разделе на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, с учетом безопасности и удобства для

оператора изготовлен опытный образец ранцевой установки для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой с использованием устройства на основе газодинамического принципа распыления жидкости (рисунок 1).



1 – устройство газодинамического принципа распыления жидкости; 2 – шланги для подачи воздуха и воды; 3 – емкость для воды; 4 – баллоны с воздухом; 5 – легочный автомат; 6 – панорамная маска.

Рисунок 11 – Общий вид опытного образца ранцевой установки для тушения локальных очагов пожара с устройством газодинамического принципа распыления жидкости

Для оценки эффективности разработанного опытного образца установки с использованием устройства проведены приемочные огневые испытания по тушению модельного очага пожара класса 1А. Установлено, что модельный очаг пожара успешно потушен с соплом длиной 20 см.

Из анализа технических характеристик ранцевых установок пожаротушения (таблица 4), следует, что разработанная установка для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой превосходит по некоторым техническим параметрам известные серийно выпускаемые установки.

Таблица 4 – Технические параметры ранцевых установок с газодинамическим принципом распыления жидкости

Показатель	Вид УПТ		
	РУПТ 1-04 «Игла» (Россия)	ГИРС-400 (Россия)	Ранцевая установка (ДНР)
Максимальная дальность (длина струи), м	10	15	17
Объем заряда огнетушащего вещества, дм ³	12	15	11
Объем сжатого воздуха, дм ³	2	2	2
Давление в баллоне, МПа	30	30	20
Рабочее давление, МПа	1	1	1
Расход огнетушащей жидкости, дм ³ /с	0,40	0,25-0,45	0,37
Расход воздуха, кг/с	0,016	0,010	0,013
Дисперсность капель, мкм	100	100	150

С учетом своих небольших габаритных размеров, ранцевая установка может транспортироваться на пожарно-спасательных автомобилях подразделений МЧС ДНР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании установленных закономерностей внутрикамерных газодинамических процессов дано решение актуальной научно-технической задачи по обоснованию параметров устройств с газодинамическим принципом распыления жидкости и для повышения эффективности тушения очагов пожара в начальной стадии.

Основные выводы, научные и практические результаты выполненной диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Анализ происшедших пожаров показал, что при применении устройств с газодинамическим принципом распыления жидкости возможно оперативно подать огнетушащие вещества и эффективно ликвидировать локальные очаги пожара в начальной стадии развития, тем самым уменьшить социальный и материальный ущерб.

2. **Разработана** математическая модель динамических процессов в стволе устройств импульсного пожаротушения с дискретным принципом распыления жидкости, полученные на основе уравнений энергетического баланса. Математическая модель учитывает влияние потерь на ускорение пожаротушающей жидкости и местное сопротивление при переходе от ствола к насадке, а также устанавливает взаимосвязь конструктивных и газодинамических параметров для научного обоснования технических требований при проектировании устройства, получения расчетных параметров для сравнения с аналогичными устройствами пожаротушения.

3. Впервые **разработана** математическая модель физических процессов в сопле устройства с газодинамическим принципом распыления жидкости, включающая дифференциальные, алгебраические уравнения и предложенную алгебраическую функцию давления с плавным изменением его по длине сопла, позволяющая определить геометрический профиль сопла. Это позволяет расчетным путем установить рациональные геометрические показатели профиля сопла ствола.

4. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых позволили **установить** скорость и максимальное расстояние газокapelного потока истекающего из разработанного устройства, а также диаметр капли. В процессе экспериментальных исследований произведена оценка уровня безопасности оператора, управляющего работой устройства.

5. **Разработан** опытный образец ранцевой установки для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой с использованием устройства на основе газодинамического принципа распыления жидкости.

6. В результате огневых испытаний экспериментально **подтверждена** эффективность разработанного устройства пожаротушения при тушении модельного очага пожара класса 1А.

7. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения ранцевой установки с использованием устройства с газодинамическим принципом распыления жидкости составит около 1,235 млн. руб.

8. *Разработаны* и утверждены МЧС ДНР методические рекомендации по применению ранцевой установки для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Ефименко, В.Л.** Применение установок импульсного пожаротушения / В.Л. Ефименко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: научный журнал АГЗ – Донецк, 2019. – Вып. 1(2). – С. 107-109.

2. Пефтибай, Г.И. Анализ ранцевых устройств пожаротушения тонкораспыленной водой / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, **В.Л. Ефименко** // Вестник Академии гражданской защиты. – Донецк, 2019. – № 1(17). – С. 68-73.

3. Пашковский, П.С. Взаимодействие капельного и теплового потоков на границе пламени пожара / П.С. Пашковский, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, **В.Л. Ефименко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: – Донецк, 2019. – №3 (56). – С. 19-27.

4. Пефтибай, Г.И. Стеклопластиковая ёмкость для ранцевой установки пожаротушения / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, М.А. Белокобыльский, **В.Л. Ефименко** // Вестник Академии гражданской защиты. – Донецк, 2019. – № 1(17). – С. 95-100.

5. Мамаев, В.В. Математическая модель динамических процессов импульсного устройства пожаротушения / В.В. Мамаев, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, **В.Л. Ефименко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: – Донецк, 2020. – №3 (57). – С. 18-26.

6. **Ефименко, В.Л.** Повышение социально-экономических результатов тушения пожара водой / **В.Л. Ефименко**, Д.О. Гуренко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: научный журнал АГЗ – Донецк, 2020. – Вып. 3(7). – С. 158-161.

7. Агеев, В.Г. Динамика движения жидкости в стволе импульсного пожаротушающего устройства / В.Г. Агеев, Н.А. Галухин, М.Н. Болдырев **В.Л. Ефименко** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: – Донецк, 2021. – №1 (58). – С. 7-16.

8. **Ефименко, В.Л.** Устройства импульсного пожаротушения. Актуальность их применения. Анализ патентных и научно-технических материалов / **В.Л. Ефименко** // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: научный журнал АГЗ – Донецк, 2021. – Вып. 3(10). – С. 138-144.

9. **Ефименко, В.Л.** Обоснование геометрических параметров сопла пожаротушающей установки / В.Л. Ефименко // Вестник Академии гражданской защиты. – Донецк, 2022. – № 2(30). – С. 12-17.

10. **Ефименко, В.Л.** Экспериментальные исследования устройства пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости / В.Л. Ефименко // Научный вестник НИИ «Респиратор»: – Донецк, 2022. – №3 (59). – С. 36-47.

11. **Ефименко, В.Л.** Прогноз процессов, происходящих в сопле устройств пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости / В.Л. Ефименко // Современные проблемы гражданской защиты: научный журнал Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России: – Россия, г. Иваново, 2022. – №3 (44). – С. 50-55.

АННОТАЦИЯ

Ефименко Виталий Леонидович. **Повышение эффективности устройств пожаротушения с газодинамическим принципом распыления жидкости.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям) (технические науки). – ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР». – Донецк, 2022.

В работе рассмотрены научные основы, модели и методы исследования процессов, сопровождающих функционирование средств пожаротушения, на основании которых разработаны математические модели физических процессов, происходящих в устройствах импульсного пожаротушения.

В результате идентификации параметров модели, осуществлен расчет геометрических параметров, разработано сопло устройства с газодинамическим принципом распыления жидкости и ранцевая установка для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой.

Ключевые слова: устройство пожаротушения, дискретный и газодинамический принцип, дальность газодапельного потока, диаметр капли, реактивная сила отдачи, геометрические параметры газодинамического сопла.

ANNOTATION

Efimenko Vitaly Leonidovich. **Improving the efficiency of fire extinguishing devices with the gas-dynamic principle of liquid spraying.** – As a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.26.03 – Fire and industrial safety (by industry) (engineering). – GBU NII “Respirator” EMERCOM DPR. – Donetsk, 2022.

The paper considers the scientific foundations, models and methods of studying the processes accompanying the functioning of fire extinguishing means, on the basis of which mathematical models of physical processes occurring in pulsed fire extinguishing devices have been developed.

As a result of the identification of the model parameters, the geometric parameters were calculated, the nozzle of the device with the gas-dynamic principle of liquid spraying and a knapsack installation for extinguishing local fire foci with thinly sprayed water were developed.

Keywords: fire extinguishing device, discrete and gas-dynamic principle, gas-drop flow range, drop diameter, reactive recoil force, geometric parameters of the gas-dynamic nozzle.