На правах рукописи

Фатеев Владимир Николаевич

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена на кафедре физической и вычислительной механики механико-математического факультета ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Голованов Александр Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент **Крайнов Алексей Юрьевич**

доктор физико-математических наук, **Медведев Валерий Викторович**

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Кемеровский Государственный университет», г. Кемерово

Защита состоится «29» декабря 2011 г. в 10 ч. 30 мин. На заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, корпус 10.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «25» ноября 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета, доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Лесные пожары уничтожают деревья и кустарники, заготовленную в лесу древесину. В результате пожаров снижаются защитные, водоохранные и другие полезные свойства леса, уничтожается фауна, сооружения, а в отдельных случаях и населенные пункты. Кроме того, лесной пожар представляет серьезную опасность для людей и сельскохозяйственных животных. Поэтому разработка и усовершенствование методов борьбы с лесными пожарами, является актуальной и важной задачей.

В Томском государственном университете на кафедре физической и вычислительной механики на основе многолетнего исследования лесных пожаров была предложена новая концепция борьбы с лесными пожарами с использованием детонационных и ударных волн (УВ) [1, 2].

Применение на практике пожаротушения методов ударно-волнового воздействия требует создания безопасных, надежных и компактных устройств, позволяющих эффективно бороться с фронтом пожара. Наиболее значимые результаты в этой области были получены А.М. Гришиным, А.Н. Головановым, А.Ф. Цимбалюком, О.В. Погореловым, В.А. Антоновым и другими учеными.

Существует несколько способов повышения эффективности подобных устройств, такие как использование конфузорных и диффузорных насадков [3-5]. Представляет интерес как с практической, так и с научной точек зрения исследование и усовершенствование этих, а также отыскание новых способов.

Объект исследования – динамика ударных волн в каналах переменного сечения, заполненных газовыми смесями, и как следствие, эффекты газодинамического воздействия волн на распространение пламени.

Предмет исследования – характеристики ударных труб с целью усиления генерируемых ударных волн; явление усиления ударных волн при использовании заслона из твердых частиц в канале ударной трубы; эффекты взаимодействия генерируемых ударных волн с фронтом низового лесного пожара.

Целью работы является разработка способов повышения интенсивности ударных волн, для их применения к тушению низового лесного пожара:

– исследование влияния конфузорных и диффузорных насадков различной геометрической формы на интенсивность ударных волн, генерируемых в ударной трубе.

– исследование усиления ударной волны в зависимости от массы твердых частиц и их месторасположения в канале ствола ударной трубы.

– теоретическое изучение исследуемых процессов с использованием математической модели сверхзвукового нестационарного газодинамического течения, инициированного взрывом порохового заряда, в цилиндрической трубе с расширением.

– проведение в лабораторных условиях исследований газодинамического воздействия ударных волн на фронт низового пожара.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов. В работе используются методы физического и математического моделирования, методы статистического анализа полученных экспериментальных данных, математические методы планирования эксперимента. Методологической базой

проводимых исследований служат работы [1-4, 6-10] и других ученых. Достоверность результатов экспериментального исследования обеспечивается корректным применением измерительных методик, статистической обработкой результатов измерений, их анализом и сравнением и известными экспериментальными и теоретическими результатами, опубликованными в научной литературе. Достоверность результатов математического моделирования и численного эксперимента обеспечивается применением обоснованной математической модели, высокой точностью разностной аппроксимации, а также сопоставлением с полученными экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту.

1. Установки для экспериментального исследования интенсивности УВ и их воздействия на фронт низового лесного пожара.

2. Результаты экспериментальных исследований по влиянию геометрических параметров диффузорных насадков эллиптического типа и геометрических параметров конических конфузоров, для повышения интенсивности ударных волн на выходе из ударной трубы.

3. Результаты экспериментальных исследований по влиянию заслона из твердых частиц во внутреннем объеме ствола ударной трубы на интенсивность генерируемых ударных волн.

4. Математическая модель и результаты численного моделирования течения газа, инициированного взрывом порохового патрона, в ударной трубе с диффузорным насадком, позволяющая установить оптимальные параметры для генерации УВ.

5. Полезная модель для локализации и тушения низовых лесных пожаров.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны и созданы установки для экспериментального исследования интенсивности УВ и их воздействия на фронт низового лесного пожара.

2. Найдены геометрические параметры диффузоров эллиптического типа и геометрические параметры конических конфузоров, обеспечивающих наибольшую интенсивность генерируемых ударных волн на выходе из ударной трубы.

3. В лабораторных условиях впервые получены данные о влиянии на интенсивность генерируемых ударных волн заслона из твердых частиц во внутреннем объеме ствола ударной трубы.

4. В двумерной постановке выполнено численное моделирование нестационарного течения газа в цилиндрической ударной трубе с диффузорным насадком. Получено качественное согласование результатов расчетов с экспериментальными данными.

5. Создана полезная модель ударно-волнового устройства для локализации и тушения низовых лесных пожаров. В полунатурных условиях испытаний показана возможность ее практического применения для тушения низовых лесных пожаров.

Практическая значимость полученных результатов определяется, в первую очередь, представленным в работе научным обоснованием повышения

эффективности применения на практике ударно-волнового метода воздействия на фронт низового лесного пожара с использованием созданного устройства [11].

Результаты, полученные в данной работе, также могут быть использованы при решении новых научно-технических задач, направленных на усовершенствование ударно-волнового метода пожаротушения. Использование результатов работы может быть рекомендовано высшим учебным заведениям физико-технического профиля (использование созданных установок в учебном процессе для проведения лабораторных работ со студентами при изучении ударно-волновых процессов), а также Министерству по чрезвычайным ситуациям РФ.

Исследования диссертационной работы проводились при поддержке грантов АВЦП № 2.1.1/2269, АВЦП № 2.1.1/12566.

Апробация работы. Наиболее значимые результаты исследований, представленные в диссертационной работе, апробированы на 10 международных, Всероссийских и региональных конференциях, таких как научная студенческая конференция, посвященная 130-летию Томского государственного университета и 60-летию механико-математического факультета (Томск, 2008), Проблемы естествознания. Молодежная научная конференция Томского государственного университета (Томск, 2009). 8-ая Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (Томск, 2009), II Международная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и XXI век» (Курск, 2010), Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2010» (Москва, 2010), Всероссийская молодежная научная конференция «Современные проблемы математики и механики» (Томск, 2010), Всероссийскя конференция с участием зарубежных ученых «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф» (Томск, 2010), XI Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2010), Международная конференция «Седьмые Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2011), X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011), а также на научном семинаре «Сопряженные задачи механики реагирующих сред и моделирование катастроф» (Томск, 2011).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 14 работ, в том числе две статьи в журналах, из списка рекомендованных ВАК: «Экологические системы и приборы», «Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского», три доклада в трудах международных конференций, патент Российской Федерации на полезную модель «Устройство для локализации и тушения низовых лесных пожаров».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы из 75 наименований и приложения. Работа содержит 110 страниц текста, 47 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы работы, формулируется цель и задачи исследования, изложены научная новизна работы и практическая значимость результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе дается краткий литературный обзор российских и зарубежных авторов по теме исследования, приводятся классификация известных способов борьбы с лесными пожарами, анализ процессов взаимодействия ударных волн с отражающими поверхностями, рассматриваются экспериментальные методики исследования ударно-волновых процессов в газовых средах, а так же математические методы исследования течений газовой динамики. Результаты литературного обзора подтверждают актуальность темы работы, обоснованность цели, задач и методов исследований.

Во втором разделе приводится описание экспериментальных установок, разработанных для создания и изучения сверхзвуковых потоков газа, а также описание измерительных методик и методов математической обработки результатов измерений.

Для генерирования ударных волн использовалась ударная труба, общий вид которой показан на рисунке 1. Экспериментальная установка состоит из стальной цилиндрической трубы – 1 с крышкой и механизмом для автоматического инициирования ударных волн – 2, конфузорных насадков конической формы – 3, диффузорных насадков эллиптической профиля – 4. Насадки эллиптического профиля были выбраны, основываясь на экспериментальных и теоретических исследованиях в работах [12-17].

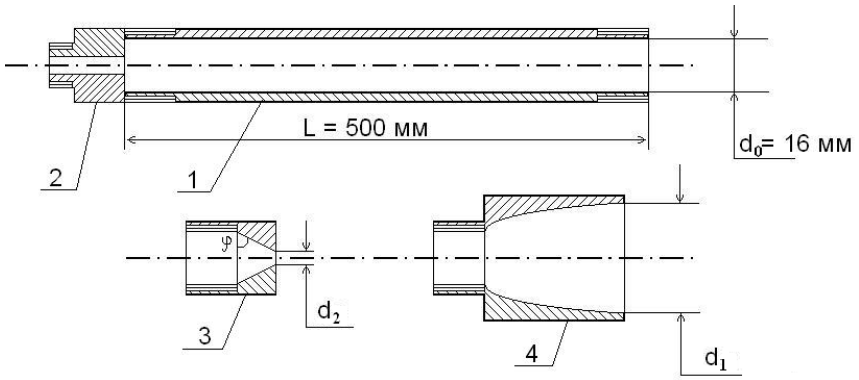

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В экспериментах регистрировалось давление во фронте УВ, определялась скорость УВ. Проведен однофакторный эксперимент по влиянию геометрических параметров диффузорных насадков эллиптического типа на газодинамические характеристики генерируемых УВ, варьировался диаметр выходного сечения диффузорного насадка d_1 (30 ÷ 50 мм), при этом длина диффузорного насадка не изменялась. Также был проведен полный двухфакторный эксперимент по влиянию геометрических характеристик конических конфузоров на изменение давления во фронте УВ, в котором варьировались два фактора: угол раствора диффузорного насадка d_2 (4 ÷ 12,5 мм) и угол раствора φ (50º ÷ 60º). Скорость распространения УВ на выходе из ударной трубы определялась как отношение расстояния между

датчиками давления ко времени, за которое УВ проходит это расстояние. Число Маха не превышало M = 2,6.

Для исследований влияния твердых частиц на интенсивность ударных волн была разработана и создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 2. Установка выполнена в виде металлической цилиндрической трубы с насадком-конценратором в виде конического конфузора с углом сужения φ = 55° и диаметром выходного отверстия d_1 = 20 мм.

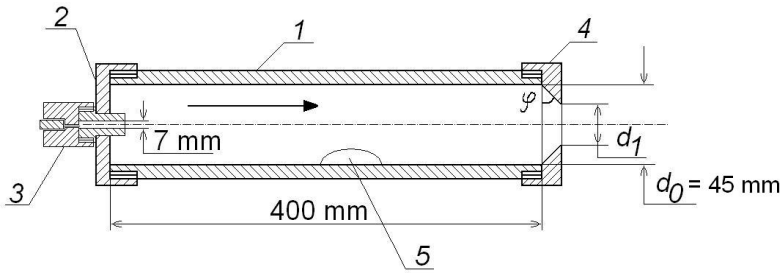

Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки
1 – цилиндрическая труба; 2 – крышка; 3 – механизм для инициирования ударных волн; 4 – конфузорный насадок; 5 – заслон из твердых частиц

В качестве твердых частиц использовался песок, вид частиц которого показан на рисунке 3.

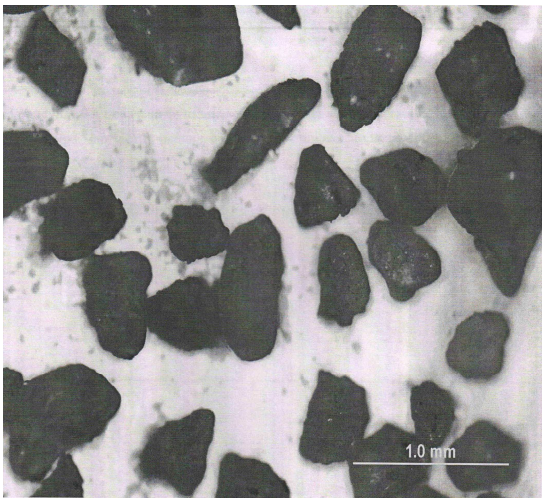

Рисунок 3 – Фотография частиц песка (SiO_2), сделанная с помощью микроскопа OLYMPUS GX-71

На рисунке 4 показана функция распределения твердых частиц, из которого видно, что размер частиц лежит в диапазоне 150–700 мкм, причем основную массу составляют частицы размером около 400 мкм.

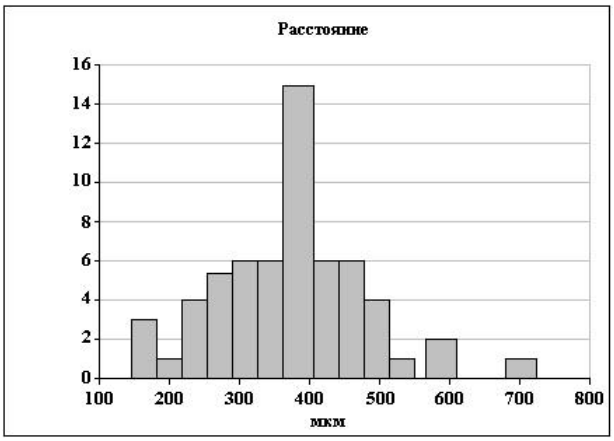

Рисунок 4 – Функция распределения для твердых частиц (SiO_2)

Во всех опытах для генерирования УВ использовались монтажные пороховые патроны шифра ДЗ со следующими характеристиками масса порохового заряда М = 0,38 г, энергия заряда 1037 Дж. Давление регистрировалось пьезоэлектрическими датчиками давления ЛХ-610, сигнал с которых поступал на цифровой запоминающий осциллограф Tektronix TDS-1002, либо GwInstek GDS-71022, полученные данные обрабатывались на компьютере. Для датчиков данного типа статическая погрешность не превышает 2 %, а динамическая – 3 %. Суммарная погрешность определения давления не превышала $\delta P \leq 5$ %. Каждый опыт повторялся 3 раза, после чего рассчитывались доверительные интервалы с доверительной вероятность 0,95.

Третий раздел посвящен экспериментальному исследованию в лабораторных условиях процессов повышения интенсивности УВ при их распространении в канале ствола с переменным сечением.

В п. 3.1 описаны основные параметры задачи: p_∞ - давление во фронте ударной волны; ρ_∞ – плотность среды; v_∞ – скорость фронта УВ; d_1 – диаметр выходного отверстия диффузорного насадка; d_2 – диаметр выходного отверстия конфузорного насадка; d_0 – диаметр канала ударной трубы, l – длина конфузорного насадка, x, y – координаты; t – время, угол раствора $\varphi = 2l/(d_0 - d_2)$.

Основными критериями подобия являются: число Маха, характеризующее отношение между скоростью течения среды и скоростью распространения в ней упругих деформаций $M = v_\infty/a_\infty$; показатель адиабаты, представляющий отношение теплоемкостей $\gamma = c_p/c_v$; число Струхаля, которое используется в качестве оценки степени нестационарности процесса $Sh = (v_\infty \cdot t)/l$.

В п. 3.2 приведены результаты исследования влияния диффузорных насадков эллиптического типа на интенсивность генерируемых УВ. Зависимость относительного давления P_2/P_1 (P_1, P_2 – давление во фронте ударной волны на выходе из трубы без насадков и с насадками соответственно), от диаметра выходного сечения d_1 диффузорного насадка эллиптического профиля приводится на рисунке 5. Видно, что наиболее интенсивная ударная волна возникает, при использовании диффузорного насадка с диаметром d_1 = 30 мм, то есть с уменьшением диаметра выходного отверстия относительное давление увеличивается. Причем увеличения давления во фронте ударной волны, сверх давления на выходе из ударной трубы без насадка, для данного типа насадков, получить не удалось.

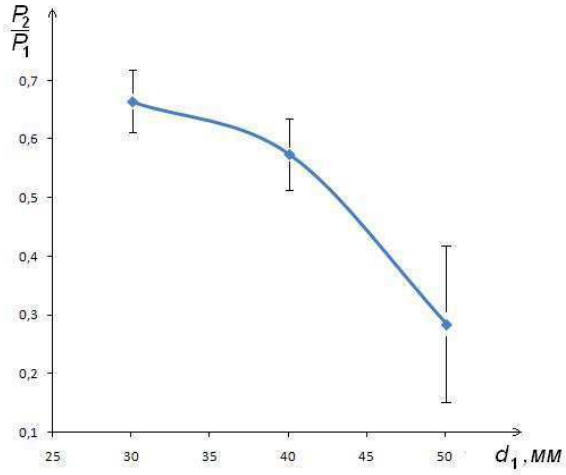

Рисунок 5 – Зависимость относительного давления
от выходного диаметра диффузорного насадка

В п. 3.3 приводятся результаты исследования по усилению УВ, распространяющихся в трубе с коническим конфузором. В таблице приведены значения относительного давления P_2/P_1 (P_1, P_2 – давление во фронте ударной волны на выходе из трубы без насадков и с насадками соответственно), при различных геометрических параметрах конических конфузорных насадков (φ = 50º ÷ 60º, d_2 = 4 ÷ 12,5 мм).

Таблица – Значения относительного давления при различных геометрических параметрах конического конфузора

φ, º / d_2, м	50º	55º	60º
0,004	0,46	0,39	0,29
0,006	0,56	0,71	0,45
0,008	0,82	1,17	0,46
0,082	_	1,09	_
0,01	_	1,36	_
0,0125	_	1,05	_

Математическая обработка результатов измерений проводилась с помощью теории планирования эксперимента. Для поиска оптимальных геометрических параметров конфузора были выбраны математические модели объекта исследования (уравнения регрессии) и проверены гипотезы об адекватности этих моделей и о значимости их коэффициентов при доверительной вероятности 0,95.

В результате решения оптимизационной задачи по повышению давления во фронте УВ с помощью конфузрных насадков, показано, что наибольшая интенсивность УВ на выходе из ударной трубы достигается при следующих геометрических параметрах конического конфузора: $\varphi = 55^{o}$, $d_2 = 10$ мм.

На рисунках 6, 7 показаны графики, описываемые уравнениями регрессии, а также нанесены среднеарифметические значения относительных давлений с доверительными интервалами.

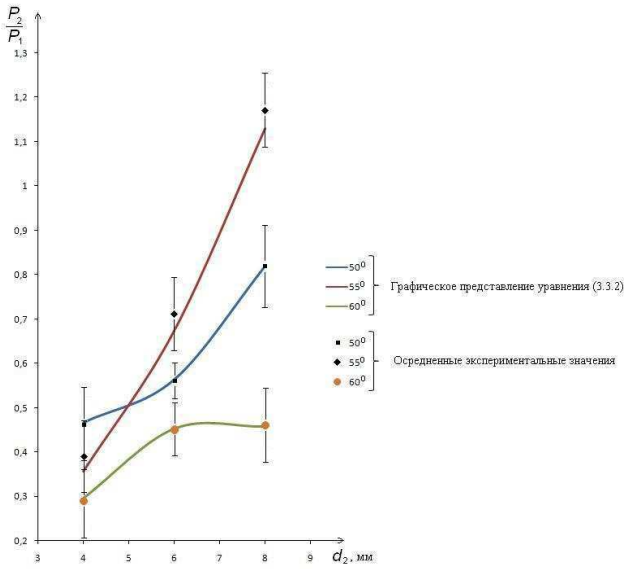

Рисунок 6 – Графики относительного давления, описанные уравнением регрессии для $\varphi = 50^{o} \div 60^{o}$, $d_2 = 4 \div 8$ мм

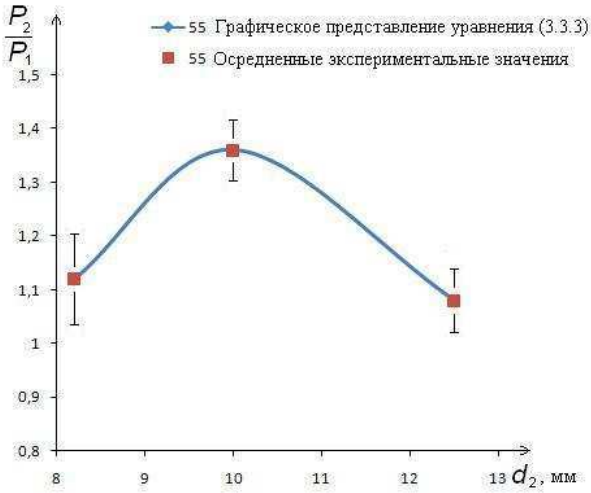

Рисунок 7 – Графики относительного давления, описанные уравнением регрессии для $\varphi = 55^{o}$, $d_2 = 8{,}2 \div 12{,}5$ мм

В п. 3.4 приводятся результаты исследования влияния затора из твердых частиц во внутреннем объеме ствола ударной трубы на интенсивность ударных волн. Проведен полный двухфакторный эксперимент, при котором варьировались масса твердых частиц и расстояние их расположения, которое отсчитывалось от выходного сечения внутрь объема ударной трубы. Диапазон изменения суммарной массы частиц был выбран от 3 до 10 г.

Графики экспериментальных значений относительного давления на выходе из ударной трубы, полученных в результате варьирования расстояния

расположения пакета с твердыми частицами от выходного сечения трубы и в результате варьирования рабочей массы твердых частиц соответственно (P_1 – давление во фронте ударной волны на выходе из трубы без использования заслона из твердых частиц, P_2 – давление во фронте ударной волны на выходе из трубы с использованием заслона из твердых частиц)приводятся на рисунках 8, 9.

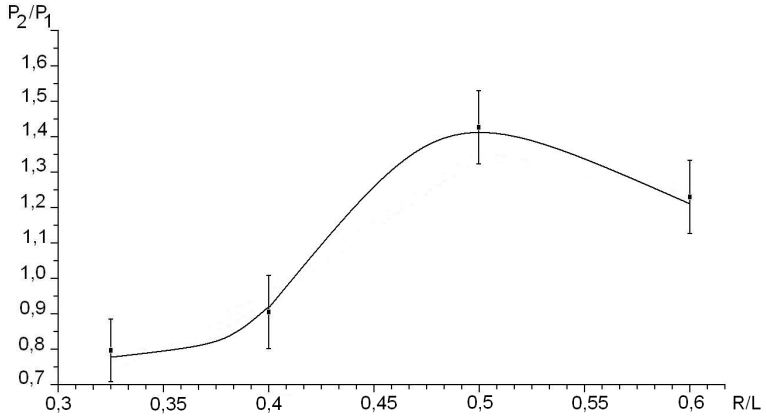

Рисунок 8 – Относительное давление газа на выходе из трубы, полученное в результате варьирования месторасположения твердых частиц в полости трубы. R/L – обезразмеренное расстояние от выходного отверстия к общей длине трубы

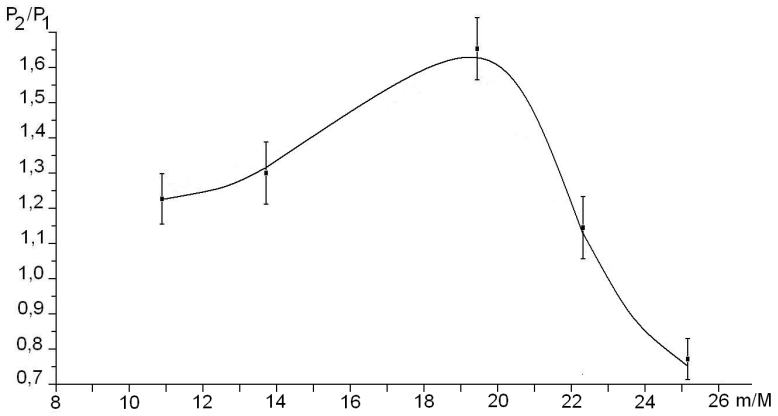

Рисунок 9 – Относительное давление газа на выходе из трубы, полученное при варьировании рабочей массы твердых частиц (m/M – отношение массы заслона из твердых частиц к массе порохового заряда)

Видно, что при варьировании расстояния закладки твердых частиц, при постоянной массе пакета, наибольшее увеличение давления во фронте ударной волны составило порядка 35 % при расстоянии закладки около 0,2 м отсчитываемое от выходного сечения внутрь объема ударной трубы. При варьировании массы твердых частиц на этом расстоянии их расположения, наибольшая интенсификация ударной волны составляет порядка 60 % при массе твердых частиц около 7 г. Таким образом, оптимальные значения параметров, при которых наблюдается наибольшая интенсификация ударной волны (62,5 %), составляют для месторасположения пакета твердых частиц 0,2 м, т.е. не более

половины длины от выхода газоотводной трубы, и 7 г для суммарной массы твердых частиц.

В п. 3.5 дается описание эксперимента по визуализации картины течения в области за дульным срезом ударной трубы с помощью шлирен-метода [5].

На рисунке 10 представлены теневые фотографии, на которых зафиксирована характерная картина течения, образующегося при выстреле монтажного порохового патрона в ударной трубе после выхода в открытое пространство вблизи среза ударной трубы, полученные в последовательные моменты времени (шаг 10^{-4} с). Регистрация процесса производилась с помощью высокоскоростной видеокамеры NAC HSSC512 при частоте съемки 10^4 кадров/с и времени выдержки кадра $5 \cdot 10^{-6}$ с.

На снимках видно, что за передним фронтом располагается область течения, имеющего периодическую (ячеистую) структуру. Данная структура формируется в ударной трубе с конфузором и сохраняется на некотором расстоянии после выхода в открытое пространство. Подобная картина течения представлена в [18].

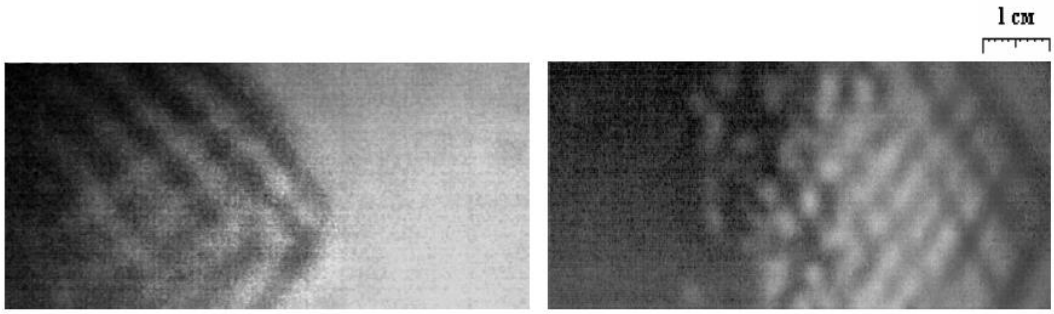

Рисунок 10 – Теневая фотография картина течения газа на выходе в открытое пространство в последовательные моменты времени [5]

В этом случае имеет место быть истечение сверхзвукового потока в открытое пространство и, поскольку толщина стенки ударной трубы достаточно велика (10^{-2} м), наиболее вероятны два варианта образования ячеистой ударно-волновой структуры.

Первый вариант подразумевает обтекание уступа сверхзвуковым потоком газа [19], причем такой вариант возможен при условии образования скачка уплотнения в канале ударной трубы. Схема такого варианта течения представлена на рисунке 11.

Второй вариант следует из работы [20]. Здесь рассматривается выход струи в открытое пространство и исследуются параметры течения в застойной отрывной зоне. Одна из возможных картин течения представлена схемой на рисунке 12.

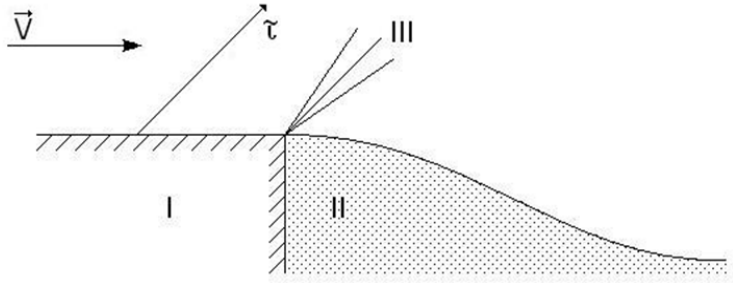

Рисунок 11 – Косой скачок уплотнения. $\vec{V}$ - вектор скорости потока,
I – уступ (стенка ударной трубы), II – застойная область,
III – веер волн разрежения, τ – вектор, касательный к фронту УВ

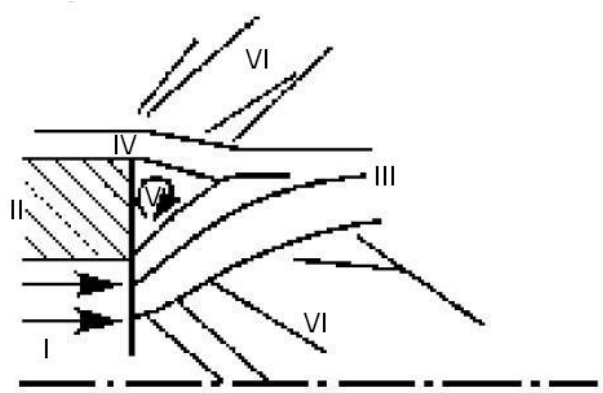

Рисунок 12 – Схема течения в застойной отрывной зоне
I – направление потока, II – уступ, III – линии тока,
IV – область эжекции, V – застойная область,
VI – скачки уплотнения

Четвертый раздел посвящен математическому моделированию течения в длинной цилиндрической трубе с расширением. Дана физическая постановка задачи: рассматривается течение, образующееся в канале ударной трубы с диффузорным расширением эллиптической формы на выходе, после срабатывания монтажного порохового патрона расположенного на входе в ударную трубу. Задача заключается в расчете нестационарного истечения из гильзы в цилиндрическую трубу с диффузорным расширением эллиптической формы, заполненную воздухом и далее в область за дульным срезом.

Основные допущения, использованные при построении математической модели: задача осесимметричная (течение в гильзе полагается одномерным, в стволе, насадке и области за дульным срезом – двумерным; предполагается что порох сгорает мгновенно во всем объеме гильзы; задача решается без учета молекулярных механизмов переноса; продукты сгорания пороха и воздух описываются в рамках модели политропного газа, показатели адиабаты считаются постоянными и известными. Смесь продуктов горения пороха и воздуха также есть совершенный газ, показатель адиабаты которого вычисляется по следующей формуле [10]:

$$\gamma = 1 + \frac{M_g c + M_a (1-c)}{\frac{M_g}{(1-\gamma_a)} + \frac{M_a}{(1-\gamma_g)}},$$

Здесь γ – показатель адиабаты, M – молярная масса, индекс g – приписывается продуктам сгорания пороха, a – воздуху (γ_g =1,25, γ_a =1,41).

Таким образом, для описания процесса движения газа в гильзе и стволе используется одномерная модель, которая представляет собой законы сохранения массы, импульса, энергии и массы воздуха [10]:

$$\oint_G \rho dx - \rho u dt = 0,$$

$$\oint_G \rho u dx - (p + \rho u^2) dt = 0,$$

$$\oint_G \rho E dx - (\rho u E dt + 2pu) dt = 0,$$

$$\oint_G \rho c dx - \rho c u dt = 0,$$

которая замыкается уравнением состояния:

$$E = \rho\left(2e + u^2\right), \; e = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}.$$

Здесь G – произвольный контур, ограничивающий площадку в плоскости переменных x,t; x – геометрическая координата, отсчитываемая от дна гильзы, p – давление, ρ – плотность, u – скорость, E – удвоенная полная энергия газа, c – массовая концентрация воздуха.

Для описания течения газа в стволе и процесса дифракции УВ в диффузорном насадке и ее распространения в области за дульным срезом используется двумерная модель, в виде системы интегральных уравнений, которая также представляет собой законы сохранения массы, импульса, энергии и массы воздуха:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S y^\nu \rho dx dy + \oint_\Gamma y^\nu \rho (u dy - v dx) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S y^\nu \rho u dx dy + \oint_\Gamma y^\nu \left[\rho u (u dy - v dx) + p dy\right] = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S y^\nu \rho v dx dy + \oint_\Gamma y^\nu \left[\rho v (u dy - v dx) - p dx\right] = \nu \iint_S p dx dy,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_S y^\nu E dx dy + \oint_\Gamma y^\nu (E + 2p)(u dy - v dx) = 0,$$

которая замыкается уравнением состояния:

$$E = \rho\left(2e + u^2 + v^2\right), \; e = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}$$

Здесь Г – произвольный контур, ограничивающий площадку S в плоскости переменных x, y цилиндрической системы координат, t – время, ρ – плотность, p – давление, e – удельная внутренняя энергия, u, v – проекции вектора скорости

$\vec{v}$ на оси x, y соответственно, γ – показатель адиабаты, E – удвоенная полная энергия газа, c – массовая концентрация воздуха.

На стенках диффузорного насадка выставляются условия непротекания, на оси симметрии условие симметрии потока, которое для газодинамической постановки совпадает с условием непротекания. На открытых границах области выставляются условия отсутствия обратного влияния на поток.

Для решения поставленной задачи использовался численный метод Годунова [9]. Данная разностная схема имеет первый порядок точности по пространственной и временной координатам, а число Куранта (критерий её устойчивости) равно единице. Область решения разбивалась расчетной сеткой $N_x \times N_y$. Количество узлов сетки выбиралось из условия неизменности результатов расчетов при уменьшении шага.

При численных расчетах задавались значения геометрических и физических величин, соответствующих экспериментам на ударной трубе. В результате численного эксперимента получены распределения газодинамических параметров в ударной трубе с эллиптическими диффузорными насадками и на выходе в область за дульным срезом.

На рисунках 13, 15, 17 показаны изобары в последовательные моменты времени, а на рисунках 14, 16, 18 приведены векторы скоростей в расчетной области в последовательные моменты времени.

На рисунке 19 показан график распределения давления внутри ударной трубы и на выходе в открытое пространство.

Анализ результатов показывает, что при выстреле монтажного порохового патрона образуется практически полусферическая ударная волна, которая, в последствие после отражения от стенок, переходит в типичное сверхзвуковую неизобарическую струю в ограниченной области. Следует отметить, что наибольшая скорость истечения газа наблюдается у насадка с диаметром выходного отверстия 30 мм, с увеличением диаметра скорость снижается (рисунки 14 д, 16 д, 18 д). Также следует отметить, что наибольшее давление на выходе в открытое пространство наблюдается у насадка с диаметром выходного отверстия 30 мм (рисунок 19). С увеличением диаметра выходного отверстия, давление снижается, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

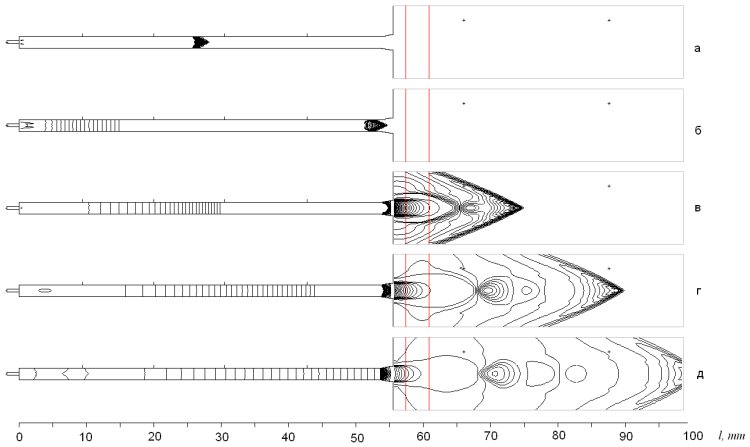

Рисунок 13 – Изобары в ударной трубе.
Диаметр выходного отверстия диффузорного насадка 30 мм,
а – $t = 10^{-4}$с, б – $t = 2 \cdot 10^{-4}$с, в – $t = 3 \cdot 10^{-4}$с, г – $t = 4 \cdot 10^{-4}$с, д – $t = 5 \cdot 10^{-4}$с.

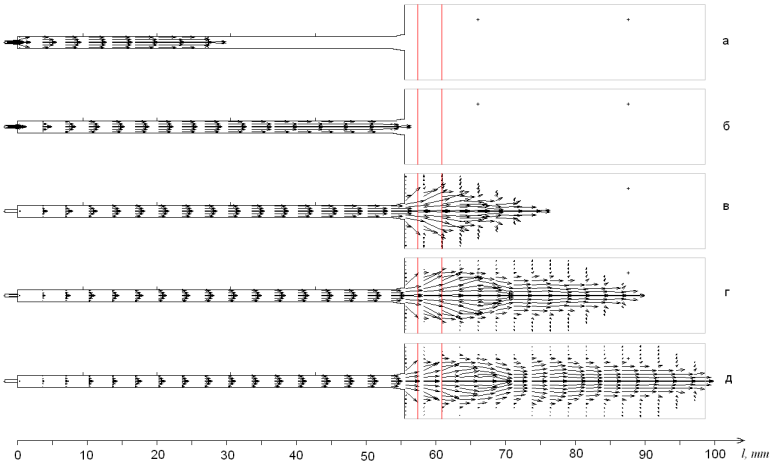

Рисунок 14 – Векторы скоростей в ударной трубе.
Диаметр выходного отверстия диффузорного насадка 30 мм,
а – $t = 10^{-4}$с, б – $t = 2 \cdot 10^{-4}$с, в – $t = 3 \cdot 10^{-4}$с, г – $t = 4 \cdot 10^{-4}$с, д – $t = 5 \cdot 10^{-4}$с.

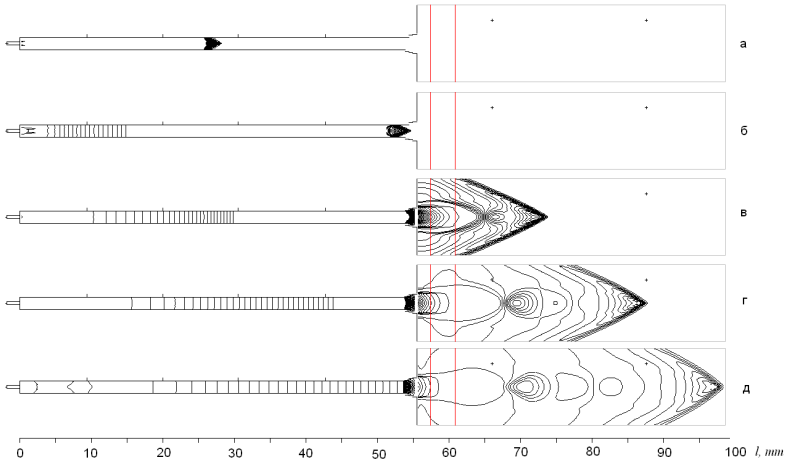

Рисунок 15 – Изобары в ударной трубе.
Диаметр выходного отверстия диффузорного насадка 40 мм,
а – $t = 10^{-4}$с, б – $t = 2 \cdot 10^{-4}$с, в – $t = 3 \cdot 10^{-4}$с, г – $t = 4 \cdot 10^{-4}$с, д – $t = 5 \cdot 10^{-4}$с.

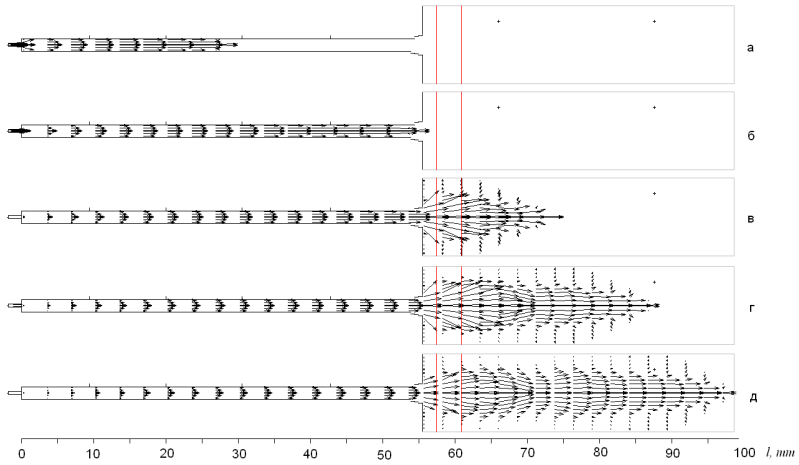

Рисунок 16 – Векторы скоростей в ударной трубе.
Диаметр выходного отверстия диффузорного насадка 40 мм,
а – $t = 10^{-4}$с, б – $t = 2 \cdot 10^{-4}$с, в – $t = 3 \cdot 10^{-4}$с, г – $t = 4 \cdot 10^{-4}$с, д – $t = 5 \cdot 10^{-4}$с.

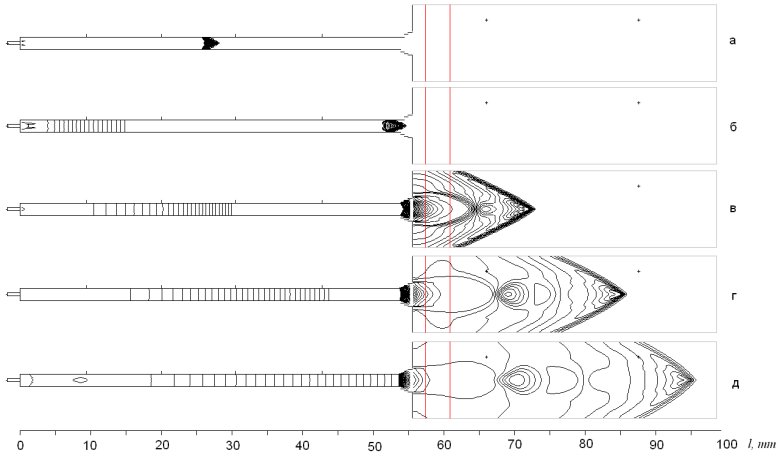

Рисунок 17 – Изобары в ударной трубе.
Диаметр выходного отверстия диффузорного насадка 50 мм,
а – $t = 10^{-4}$с, б – $t = 2 \cdot 10^{-4}$с, в – $t = 3 \cdot 10^{-4}$с, г – $t = 4 \cdot 10^{-4}$с, д – $t = 5 \cdot 10^{-4}$с.

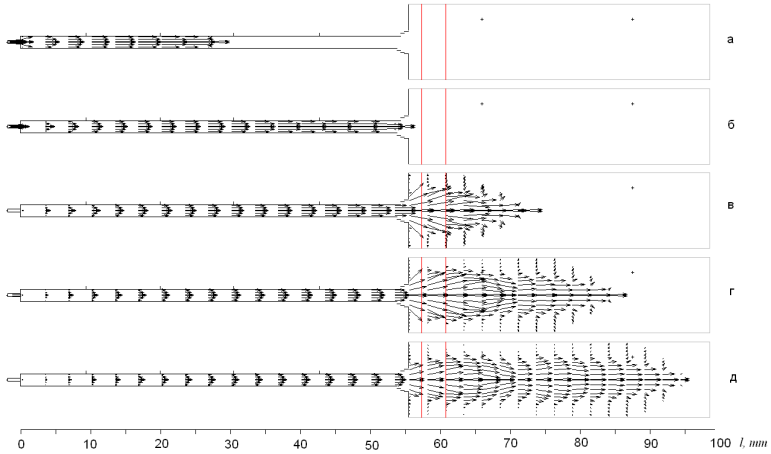

Рисунок 18 – Векторы скоростей в ударной трубе.
Диаметр выходного отверстия диффузорного насадка 50 мм,
а – $t = 10^{-4}$с, б – $t = 2 \cdot 10^{-4}$с, в – $t = 3 \cdot 10^{-4}$с, г – $t = 4 \cdot 10^{-4}$с, д – $t = 5 \cdot 10^{-4}$с.

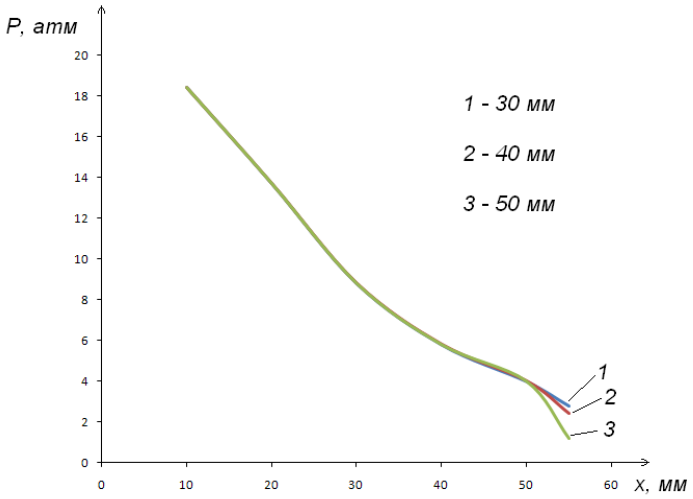

Рисунок 19 – Давление на выходе из ударной трубы
при различных значениях диаметра выходного отверстия

В пятом разделе представлены результаты экспериментального исследования воздействия УВ с использованием заслона из твердых частиц на фронт низового пожара в лабораторных условиях.

В п. 5.1 изложены результаты лабораторных экспериментов по воздействию УВ с песком на фронт низового лесного пожара.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. На экспериментальном стенде I, на поверхность грунта, выкладывались лесные горючие материалы. Генератор УВ II располагался на безопасном расстоянии 2 метра от огневого стенда I (рисунок 20) Влияние ветра не учитывалось. На кромке ЛГМ, состоящей из опада листвы, хвои сосны и кедра инициировался фронт низового лесного пожара (рисунок 21). Высота пламени не превышала 0,5 м. После формирования фронта горения осуществлялось его тушение (рисунок 22) с помощью генератора ударных волн с песком.

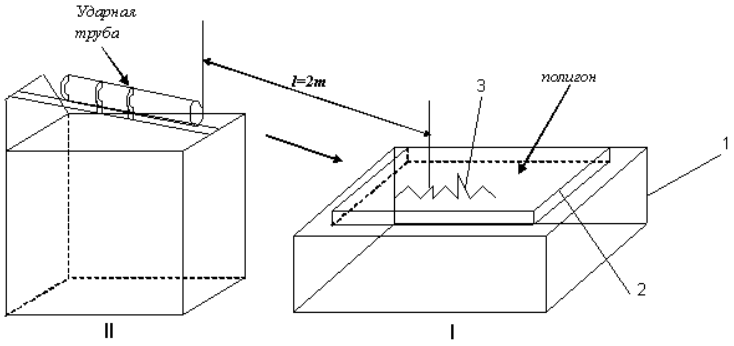

Рисунок 20 – Схема экспериментального комплекса для
тушения низового лесного пожара ударными волнами с песком

Рисунок 21 – Фотография фронта низового лесного пожара

Рисунок 22 – Фотография площадки с ЛГМ после тушения ударными волнами с песком

Результаты испытаний подтвердили эффективность предложенного способа тушения низовых лесных пожаров ударными волнами с песком. Один «выстрел» обеспечивает локальное прекращение горения ЛГМ на площади радиусом (0,2 ÷ 0,25) м. Причем тушение пламени осуществлялось с безопасного для обслуживающего персонала расстояния 2 метра, что соответствует требованиям к безопасности проведения работ по тушению пожаров [21].

В п. 5.2 приводится описание полезной модели устройства для локализации и тушения низовых лесных пожаров [11].

В выводах сформулированы основные научные результаты диссертационной работы:

1. Созданы оригинальные экспериментальные установки для исследования газодинамических характеристик ударных волн и их воздействия на фронт низового лесного пожара.

2. В результате экспериментальных исследований интенсивности УВ на выходе из трубы с коническим конфузорным насадком решена оптимизационная задача и найдены значения геометрических параметров (диаметр выходного сечения d_2 = 10 мм, угол сужения φ = 55º), которые обеспечивают максимальное повышение давления во фронте УВ на 36,7 %.

3. На основе выполненного в лабораторных условиях экспериментального исследования по влиянию затора из твердых конденсированных частиц во внутреннем объеме ствола ударной трубы, найдены значения параметров (масса твердых частиц составляет около 7 г, расстояние от выходного сечения трубы до места закладки твердых частиц порядка 0,2 м), обеспечивающих наибольшую

интенсивность ударной волны (повышение давления во фронте ударной волны на 62,5 %).

4. На основе разработанной математической модели осесимметричного нестационарного течения газа в цилиндрическом канале с диффузорным расширением проведены численные расчеты распределений газодинамических параметров, проанализировано влияние геометрии ударной трубы на характеристики генерируемых ударных волн.

5. Исследование в лабораторных условиях воздействия на фронт низового лесного пожара показало, что использование труб с коническим конфузором оптимальной формы (диаметр выходного сечения конфузорного насадка 20 мм, угол сужения конфузорного насадка 55^{o}) и заслоном из твердых частиц (масса твердых частиц составляет около 7 г, расстояние от выходного сечения до места закладки твердых частиц порядка половины длины трубы), позволяет значительно повысить эффективность и безопасность ударно-волновых устройств для борьбы с низовыми лесными пожарами.

6. На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований создана полезная модель для локализации и тушения низовых лесных пожаров, апробированная в полунатурных условиях.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
2. Гришин А.М. Физика лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1994. – 218 с.
3. Гришин А.М. Экспериментальное и теоретическое исследование воздействия взрыва на фронт верхового лесного пожара / А.М. Гришин, Ю.М. Ковалев // ДАН СССР. – 1989. – Т.308, №5. – С. 1074-1078.
4. Гришин А.М. Об усилении ударных волн при взаимодействии с фронтом лесного пожара / А.М. Гришин, Ю.М. Ковалев // ДАН СССР. – 1990. – Т.312, №1. – С. 50-54.
5. Ануфриев И.С. Физическое и математическое моделирование ударно-волновых процессов, обеспечивающих интенсивное воздействие на фронт низового лесного пожара. Дисс. на соиск. уч. степени канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, –2009. –112с.
6. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. 2-е изд. перераб. и доп. / И. Ф. Кобылкин [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 376 с.
7. Баум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1959. – 800 с.
8. Самарский А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики. Учебное пособие для вузов. 3-е изд., доп. / А.А. Самарский, Ю.П. Попов. –М.: Наука, 1992. – 424 с.
9. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов [и др.]. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
10. Черный Г. Г. Газовая динамика: учебник для университетов и втузов / Г. Г. Черный. – М.: Наука, 1988. – 424 с.

11. Пат. на пол. мод. RU 100910 U1 Российская Федерация, МПК A 62 C 3/00. Устройство для локализации и тушения низовых лесных пожаров / А.Н. Голованов, В.Н. Фатеев, И.Е. Ивандаев №2010118867/12; заявл. 11.05.2009; опубл. 10.01.2010, Бюл. №1.
12. Пат. 2033826 CI Россия, МКИ 6 A 62 C 3/02. Устройство для локализации и тушения лесных пожаров / А.М. Гришин, В.А. Антонов, Л.Ю. Наймушина, А.Н. Голованов, Ю.В. Кустов. – №4852597; заявлено 20.07.90; опубл. 30.04.95, Бюл. № 12.
13. Пат. на пол. мод. 19572 Россия. Устройство для локализации и тушения низовых лесных пожаров / А.М. Гришин, В.П. Зима, В.И. Самойлов, А.Ф. Цимбалюк. – №2000123272/20; заявл. 11.09.2000; опубл. 10.09.2001, Бюл. № 25.
14. Гришин А.М. Экспериментальная отработка модели дезинтегратора на фронте низового лесного пожара / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, В.П. Зима, В.И. Самойлов, А.Ф. Цимбалюк // Математическое и физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии: Избранные доклады международной конференции, Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. – 240 с.
15. Гришин А.М. Экспериментальная проверка эффективности действия дезинтегратора на фронт низового лесного пожара / А.М. Гришин, В.П. Зима, В.И. Самойлов // Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и экологических последствий: материалы международной конференции. – Томск, 1997. – 156 с.
16. Гришин А.М. Математическое моделирование процессов формирования сверхзвуковой струи в дезинтеграторе лесных пожаров / А.М. Гришин, В.И. Самойлов, А.Ф. Цимбалюк // Материалы международной конференции «Сопряженные задачи механики и экологии». –Томск. 1998. – С. 86-88.
17. Гришин А.М. Теоретическая и экспериментальная обработка конструкции дезинтегратора низовых лесных пожаров / А.М. Гришин, [и др.]. // Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и экологических последствий: материалы международной конференции, – Томск, 1999. – 182 с.
18. An album of fluid Motion / Assembled by Milton Van Dyke. – Stanford (USA): Parabolic Press, 1982. – 182 p.
19. Лунев В.В. Течение реальных газов с большими скоростями / В.В. Лунев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 750 с.
20. Зубков А.И. Сверхзвуковое обтекание осесимметричных тел при горении в передних и донных зонах отрыва / А.И. Зубков [и др.]. // Теплофизика и аэромеханика. –Новосибирск, 2005. –Т.12., №1. –С. 45-58.
21. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. - М.: Гослесхоз СССР, 1976. – 110 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Фатеев В.Н.** Математическое моделирование усиления ударных волн в дезинтеграторе низовых лесных пожаров / В.Н. Фатеев // Научная студенческая конференция, посвященная 130-летию Томского государственного университета и 60-летию механико-математического факультета: Сборник материалов – Томск: Томский государственный университет, 2008. – С. 122-123.
2. Голованов А.Н. Математическое моделирование процессов усиления ударных волн в дезинтеграторе низовых лесных пожаров / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев**, А.Ф Цимбалюк // Экологические системы и приборы. – 2009. №4. – С. 24-28.
3. Голованов А.Н. Математическое и физическое моделирование усиления ударных волн / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев**, А.Ф. Цимбалюк // Проблемы естествознания. Молодежная научная конференция Томского государственного университета. Вып. II. – Томск: Томский государственный университет, 2009. – С. 337-340.
4. Голованов А.Н. Математическое моделирование усиления ударных волн в дезинтеграторе низовых лесных пожаров / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев**, А.Ф. Цимбалюк // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Материалы 8-й Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых. – Томск, 2009. – С. 31-32.
5. **Фатеев В.Н**. Экспериментальное исследование усиления ударных волн / В.Н. Фатеев // II Международная молодежная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и XXI век»: Сборник материалов – Курск, 2010. – С. 73-75.
6. **Фатеев В.Н.** Физическое моделирование процессов усиления ударных волн / В.Н. Фатеев // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2010» [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. требования: ПК с процессором 486+; Windows 95; дисковод CD-ROM; Adobe Acrobat Reader., 45_983_13044.pdf
7. Голованов А.Н. Экспериментальное исследование газодинамических характеристик ударных волн при варьировании геометрических параметров газогенерирующих устройств / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев** // Современные проблемы математики и механики: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции Томского государственного университета – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С.53-55.
8. Голованов А.Н. Экспериментальное исследование усиления ударных волн / А.Н. Голованов, И.Е. Ивандаев, **В.Н. Фатеев** // Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф: Материалы Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С.37-38.

9. Голованов А.Н. Определение газодинамических параметров ударных волн / А.Н. Голованов, И.Е. Ивандаев, **В.Н. Фатеев** // Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф: Материалы Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С.38-39.
10. Голованов А.Н. Физическое моделирование усиления ударных волн / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев** // Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф: Материалы Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. – С.42-43.
11. Голованов А.Н. Экспериментальное исследование влияния геометрических параметров газогенерирующих устройств на газодинамические характеристики ударных волн / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев** // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: тез. докл. XI Всерос. школы-конф. молодых ученых. – Новосибирск, 2010. – С. 30-31.
12. Голованов А.Н. Экспериментальное исследование газодинамических характеристик ударных волн / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев** // Международная конференция «Седьмые Окуневские чтения». Санкт-Петербург: Материалы докладов / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2011. – С.276-278.
13. **Фатеев В.Н.** Экспериментальное исследование затора из твердых частиц на газодинамические параметры генерируемых ударных волн / В.Н. Фатеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского Н.Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4., Ч.2., Т.4. – С.1067-1068.
14. Пат. на пол. мод. RU 100910 U1 Российская Федерация, МПК A 62 C 3/00. Устройство для локализации и тушения низовых лесных пожаров / А.Н. Голованов, **В.Н. Фатеев**, И.Е. Ивандаев №2010118867/12; заявл. 11.05.2009; опубл. 10.01.2010, Бюл. №1.