

На правах рукописи



Ануфриев Игорь Сергеевич

**ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИНТЕНСИВНОЕ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ФРОНТ
НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА**

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»
03.00.16 – «Экология» (физико-математические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Диссертация выполнена в учреждении Российской академии наук Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН и на кафедре физической и вычислительной механики государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Томского государственного университета.

Научные руководители: доктор физико-математических наук
Шарыпов Олег Владимирович

доктор технических наук
Голованов Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Троицкий Олег Юрьевич

доктор физико-математических наук
Крайнов Алексей Юрьевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт гидродинамики им. М.Л.
Лаврентьева Сибирского отделения РАН

Защита состоится 4 декабря 2009 в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «__» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета д.т.н.



Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время подробно исследованы фундаментальные закономерности процессов инициирования и распространения ударных волн (УВ) в химически инертных газовых средах, в том числе – в каналах различной формы. УВ широко используются при изучении физики неравновесных процессов. Все большее применение УВ находят в области решения прикладных задач. Одно из важных новых направлений практического применения УВ связано с их взаимодействием с процессами горения. В зависимости от конкретных условий УВ могут приводить, как к интенсификации горения (вплоть до перехода к детонационному режиму), так и к его подавлению (вплоть до прекращения). Последнее позволило разработать ударно-волновые методы борьбы с лесными пожарами [1], представляющими огромную опасность и наносящими значительный экономический ущерб.

Фронт, как верхового, так и низового лесного пожара имеет сложную структуру, включающую зону прогрева, сушки и пиролиза лесных горючих материалов (ЛГМ), горения газообразных продуктов пиролиза и догорания конденсированных продуктов. Разрушение структуры фронта пожара приводит к прекращению его распространения [1]. Наиболее уязвимой частью являются зоны пиролиза и смешения горючих продуктов пиролиза с кислородом: достаточно относительно небольшого воздействия на эту зону, чтобы произошел взрыв и пламенное горение прекратилось. Используя этот эффект, можно разрушить структуру фронта лесного пожара и прекратить его распространение. Данный подход представляет собой конкретное содержание новой концепции борьбы с лесными пожарами, предложенной в работе [1]. Недостаток информации о предельных концентрациях продуктов пиролиза, способных детонировать, ограничивает поиск эффективных научно-технических решений по использованию ударно-волнового метода пожаротушения. Поэтому исследование взаимодействия УВ с продуктами пиролиза ЛГМ различной концентрации является актуальной задачей.

Реализация ударно-волнового метода пожаротушения требует создания безопасных, надежных и компактных устройств, примеры которых известны [2]. В настоящее время актуальной является задача повышения эффективности подобных устройств. Одним из путей решения данной проблемы служит повышение интенсивности генерируемых УВ. Способ, предложенный в [3], предполагает использование ударной трубы с коническим конфузورным насадком. Реализация предложенного метода требует соответствующего научного обоснования. Этим обусловлена актуальность физического и математического моделирования процессов интенсификации УВ при распространении в сужающемся канале.

Объектом исследования в диссертационной работе является динамика УВ в каналах переменного сечения, заполненных инертными и горючими

газовыми смесями, эффекты газодинамического воздействия на распространение пламени.

Предметом исследования служат закономерности усиления УВ при распространении в смесях воздуха с продуктами пиролиза ЛГМ и при прохождении через конфузурную часть ударной трубы, а также факторы, определяющие эффективность ударно-волнового метода тушения низовых лесных пожаров.

Методы исследования. В диссертационной работе используются методы физического и численного моделирования, методы статистического анализа полученных данных. Методологической базой исследования служат работы [1, 5-14, 16-19].

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является изучение ударно-волновых процессов, обеспечивающих интенсивное газодинамическое воздействие на фронт низового лесного пожара, и научное обоснование повышения эффективности практического применения ударно-волнового метода пожаротушения. В соответствии с целью, решались следующие задачи:

1. Обзор современного состояния исследований по теме работы.
2. Разработка и создание экспериментальных установок для исследования динамики генерируемых УВ, для получения продуктов пиролиза ЛГМ и для газодинамического воздействия на фронт низового лесного пожара.
3. Проведение экспериментальных исследований по определению:
 - оптимальных геометрических параметров конических конфузуров для повышения интенсивности УВ на выходе из ударной трубы;
 - изменения интенсивности УВ при распространении в горючей газовой смеси с различной концентрацией продуктов пиролиза ЛГМ;
 - эффективности воздействия УВ на фронт низового лесного пожара.
4. Математическое моделирование нестационарного процесса распространения УВ в цилиндрической ударной трубе с коническими конфузурными, сравнительный анализ результатов расчетов с полученными экспериментальными данными.
5. Разработка и создание полезной модели устройства для локализации и тушения лесных пожаров.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны и созданы установки и стенды для экспериментального исследования динамики УВ и их воздействия на фронт низового лесного пожара (в лабораторных условиях).
2. Впервые в лабораторных условиях получены данные о влиянии концентрации продуктов пиролиза ЛГМ в воздухе на интенсивность УВ.
3. Найдены оптимальные геометрические параметры конических конфузуров, обеспечивающие максимальное увеличение давления во фронте УВ на выходе из ударной трубы.

4. В двумерной постановке выполнен численный расчет нестационарного течения газов в модели нового перспективного ударно-волнового устройства для борьбы с лесными пожарами.

5. С использованием созданной полезной модели ударно-волнового устройства для локализации и тушения лесных пожаров в полунатурных условиях показаны возможности эффективного тушения низовых лесных пожаров.

На защиту выносятся:

1. Разработанные установки и стенды для экспериментального исследования динамики УВ и газодинамического воздействия на фронт низового лесного пожара.

2. Результаты экспериментального определения влияния концентрации продуктов пиролиза ЛГМ в воздухе и геометрических характеристик конических конфузоров на параметры УВ в ударной трубе.

3. Математическая модель и результаты численного моделирования инициированного взрывом ударно-волнового течения газа в ударной трубе с коническим конфузуром, позволяющие установить оптимальные параметры генератора УВ.

4. Обоснование способа тушения низовых лесных пожаров и созданная полезная модель устройства для локализации и тушения лесных пожаров, демонстрирующая эффективный и безопасный способ пожаротушения.

Достоверность. Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечена корректным применением измерительных методик и средств измерений, использованием различных способов инициирования УВ, статистической обработкой результатов измерений, их анализом и сравнением с известными экспериментальными и теоретическими данными, опубликованными в научной литературе. Достоверность результатов численного моделирования обеспечивается применением обоснованной математической модели, высокой точностью разностной аппроксимации, тестированием алгоритма на известных задачах, а также сопоставлением с полученными экспериментальными данными.

Практическая значимость полученных результатов определяется, в первую очередь, важностью представленного в работе научного обоснования повышения эффективности практического применения ударно-волнового метода пожаротушения, в том числе – с использованием созданного устройства для локализации и тушения лесных пожаров [15]. Данные результаты работы значимы для решения практических задач предотвращения негативных экономических и экологических последствий лесных пожаров. Полученные результаты также могут найти применение при решении новых научно-технических задач, направленных на совершенствование способов пожаротушения на основе ударно-волнового метода. Использование полученных результатов может быть рекомендовано Министерству по чрезвычайным ситуациям РФ, а также высшим учебным заведениям физико-

технического профиля (использование созданных стендов и установок учебном процессе для проведения лабораторных занятий со студентами при изучении ударно-волновых процессов).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены 2005-2009 гг. на 15 международных, всероссийских и региональных конференциях (см. список публикаций по теме диссертации), на научных семинарах: лаборатории радиационного теплообмена ИТ СО РАН 28.04.2009 г., отдела термодинамики веществ и излучений ИТ СО РАН 08.10.2009 г., кафедры физической и вычислительной механики ТГУ 15.10.2009 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и списка литературы из 96 наименований на русском и иностранных языках. Работа содержит 112 страниц текста, 44 рисунка и 7 таблиц.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах, приведенных в списке публикаций по теме диссертации, включающем 20 работ, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 8 докладов в трудах международных конференций, патент РФ на полезную модель устройства для локализации и тушения лесных пожаров. Выполнение исследований было поддержано грантами РФФИ № 08-01-90703-моб_ст, № 09-08-09222-моб_з, № 07-08-00296-а.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В разделе 1 дается краткий литературный обзор российских и зарубежных работ по теме исследования, в том числе – описывается классификация известных способов борьбы с лесными пожарами, приводится анализ процессов взаимодействия УВ с отражающими поверхностями, рассматриваются экспериментальные методы исследования ударно-волновых процессов в газовых средах и численные методы решения нелинейных систем уравнений газовой динамики. Результаты обзора подтверждают актуальность темы работы, обоснованность цели, задач и методов исследований.

Раздел 2 посвящен описанию экспериментальных установок, разработанных для создания и изучения сверхзвуковых и высокоэнтальпийных течений газа, для получения продуктов пиролиза ЛГМ, а также описанию измерительных методик и методов математической обработки результатов измерений.

Генерирование УВ осуществлялось двумя способами. В первом использовалась ударная труба с камерами высокого и низкого давления, разделенными мембраной (рисунок 1). Данная установка предназначена для исследования эффекта усиления УВ при распространении в смеси продуктов пиролиза ЛГМ с воздухом. Стехиометрическая смесь ацетилена с кислородом

при нормальном давлении подавалась в отсек I ударной трубы, инициирование осуществлялось с помощью высоковольтного (40 кВ) высокочастотного разряда через зазоры контактов. В результате резкого возрастания давления в отсеке I происходил разрыв мембраны, и в отсеке II, заполненном смесью воздуха с продуктами пиролиза ЛГМ заданной объемной концентрации, распространялась УВ. Продукты пиролиза ЛГМ получали с помощью газогенератора (рисунок 2) [4]. Способ получения продуктов пиролиза ЛГМ: исходный материал (древесина (опилки), хвоя кедра и сосны) помещался в кварцевую трубку и нагревался до температуры пиролиза $T = (600 \div 650) \text{ K}$ [1] с помощью регулятора напряжения в электронагревателе. Продукты пиролиза из газогенератора поступали в емкость известного объема, заполненной водой, вытесняя жидкость. Полученный объем продуктов пиролиза подавался при комнатной температуре в отсек II ударной трубы и перемешивался с воздухом (выходное отверстие ударной трубы было заглушено мембраной).

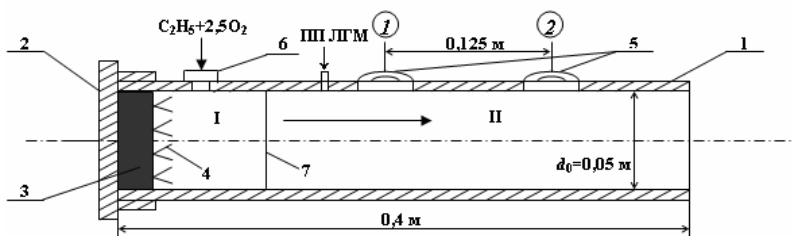


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки (ударной трубы): стальная цилиндрическая труба – 1, крышка – 2, пробка из текстолита – 3, равномерно размещенные контакты с зазорами – 4, отверстия для крепления датчиков давления – 5, отверстия со штуцерами для подачи взрывчатой газовой смеси – 6, мембрана – 7, цифры в окружностях – номера измерительных точек, ПП ЛГМ – канал подачи продуктов пиролиза ЛГМ

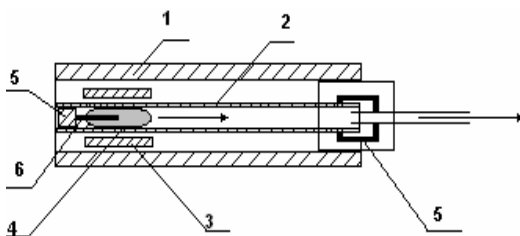


Рисунок 2 – Схема газогенератора для получения продуктов пиролиза ЛГМ: корпус – 1, кварцевая трубка – 2, электронагреватель – 3, исходный материал – 4, пробки – 5, термопара – 6

Объемная концентрация продуктов пиролиза ЛГМ в смеси с воздухом (C) в отсеке II трубы варьировалась в пределах $C = 0,05 \div 0,70$. В экспериментах с помощью пьезоэлектрических датчиков давления ЛХ–610 регистрировалось давление во фронте УВ в двух точках с известным расстоянием между ними (рисунок 1). Регистрация сигналов, поступающих с датчиков давления,

производилась при помощи цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS-1002, полученные данные обрабатывались на компьютере.

Во втором способе генерирования УВ использовались продукты взрыва монтажных пороховых патронов шифра Д, диаметром 6,8 мм (данный источник инициирования УВ был выбран из соображений экономичности при дальнейшем практическом использовании в новом устройстве для борьбы с лесными пожарами). Схема установки показана на рисунке 3. Данная установка предназначена для исследования динамики УВ при их распространении в цилиндрической ударной трубе с коническим конфузуром.

В экспериментах регистрировалось давление во фронте УВ, определялась скорость УВ. Был проведен полный двухфакторный эксперимент по влиянию геометрических характеристик конических конфузуров на перепад давления во фронте УВ. В экспериментах варьировались два фактора: угол раствора насадка φ ($35^\circ \div 65^\circ$) и диаметр выходного отверстия d_1 ($0,01 \div 0,02$ м). Давление регистрировалось на стенке ударной трубы и на выходе из трубы. Скорость УВ определялась как отношение расстояния между датчиками давления к интервалу времени, в течение которого УВ проходит этот участок. Число Маха не превышало значения $M = 3$.

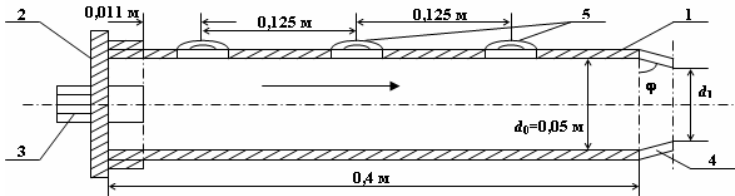


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки (ударной трубы): стальная цилиндрическая труба – 1, крышка – 2, механизм инициирования ударных волн – 3, конический насадок – 4, датчики давления – 5

При обработке результатов измерений применены методы теории планирования эксперимента. Суммарные погрешности определения концентрации продуктов пиролиза и давления не превышали: $\delta C \leq 4\%$, $\delta p \leq 5\%$. По результатам измерений (3÷5 опытов) рассчитывались доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,95.

Раздел 3 посвящен экспериментальному исследованию в лабораторных условиях процессов интенсификации УВ при распространении в смеси воздуха с продуктами пиролиза ЛГМ, а также в химически инертной среде в ударной трубе с конфузуром.

В п. 3.1 описаны основные параметры задачи, среди них: p_∞ – давление во фронте УВ; v_∞ – скорость УВ; ρ_∞ – плотность среды; γ – показатель адиабаты газовой смеси; d_0 – диаметр ударной трубы; l – длина насадка; d_1 – диаметр выходного отверстия конфузуров; угол раствора $\text{tg} \varphi = 2l / (d_0 - d_1)$.

Основным критерием подобия является число Маха, характеризующее отношение между скоростью течения среды и скоростью распространения в ней упругих деформаций $M = v_{\infty} / a_{\infty}$.

В п. 3.2 представлены результаты исследования эффекта усиления УВ при ее распространении в смеси воздуха с продуктами пиролиза ЛГМ. На рисунке 4 представлены зависимости относительной интенсивности УВ от объемной концентрации продуктов пиролиза ЛГМ ($\Delta p = p - p_0$, где p и p_0 – давление в заданной точке секции II ударной трубы при наличии продуктов пиролиза ЛГМ и без них, соответственно). Анализ полученных результатов показывает, что наличие продуктов пиролиза ЛГМ может приводить к существенному повышению параметров УВ (рисунок 4). При увеличении объемной концентрации продуктов пиролиза до 0,50 интенсивность УВ монотонно возрастает, при более высокой концентрации продуктов пиролиза наблюдается уменьшение данного эффекта. Судя по различию кривой 1 и кривой 2 на рисунке 4, эффект повышения относительной интенсивности УВ возрастает по мере ее распространения в трубе. Это свидетельствует о том, что основная причина усиления УВ связана с химическими реакциями и величина эффекта определяется соотношением продуктов пиролиза и окислителя. Полученные результаты качественно согласуются данными работ [1, 5-7], в которых на основе результатов натуральных экспериментов и математического моделирования описан эффект усиления на (5÷8)% интенсивности УВ при тушении лесных пожаров.

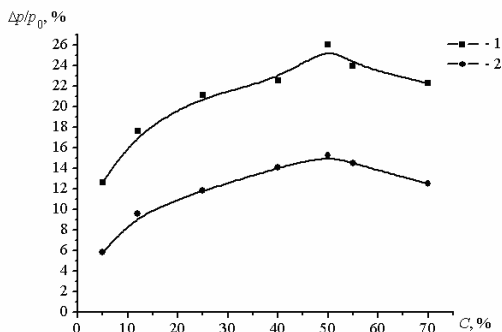


Рисунок 4 – Изменение относительного давления УВ в зависимости от объемной концентрации продуктов пиролиза в первой (кривая 2) и во второй (кривая 1) измерительных точках

В п. 3.3 приводятся результаты исследования динамики УВ, распространяющихся в ударной трубе с коническим конфузуром. На рисунке 5 представлено давление во фронте УВ в ударной трубе и на выходе из нее при различных значениях угла раствора конфузуров, $d_1 = 0,02$ м. В области конфузуров происходит значительное повышение давления в УВ, что можно объяснить маховским (нерегулярным) отражением скачков от стенок. В таблице

приведены значения относительного давления p_2/p_1 (где p_1 и p_2 – давление во фронте ударной волны на выходе из трубы без конфузора и с конфузором, соответственно) при различных геометрических характеристиках конического конфузора ($\varphi = 35^\circ \div 65^\circ$, $d_1 = 0,01 \div 0,02$ м).

Математическая обработка результатов измерений проводилась с применением теории планирования эксперимента. Для поиска оптимальных геометрических характеристик конфузора была выбрана математическая модель объекта исследования (уравнение регрессии) и проверена гипотеза об адекватности этой модели при доверительной вероятности 0,95. В результате решения оптимизационной задачи по повышению интенсивности УВ за счет отражения от конической поверхности конфузора показано, что наибольшая интенсивность УВ на выходе из ударной трубы достигается при следующих геометрических параметрах конфузора: $\varphi = 55^\circ$, $d_1 = 0,02$ м.

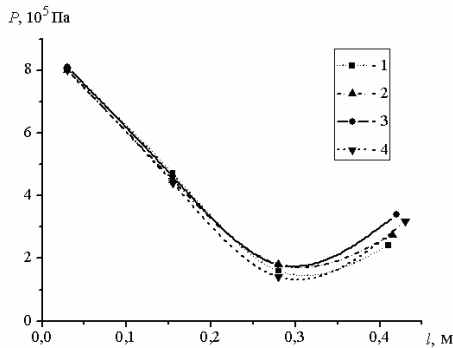


Рисунок 5 – Давление в УВ при различных значениях угла раствора конфузора: 1 – $\varphi = 35^\circ$; 2 – $\varphi = 45^\circ$; 3 – $\varphi = 55^\circ$; 4 – $\varphi = 65^\circ$

Таблица – Значения относительного давления при различных геометрических характеристиках конического конфузора

$d_1, \text{ м}$ \ φ	35°	45°	55°	65°
0,01	0,53	0,64	0,92	0,95
0,015	0,62	0,71	1,04	1,02
0,02	0,71	0,88	1,20	1,09

В п. 3.4 приведены результаты визуализации течения в с помощью теневой фотосъемки (Шлирен-метод). Фоторегистрация процессов осуществлялась при помощи высокоскоростной цифровой кинокамеры NAC HSSC512. На рисунке 6 представлены теневые фотографии, на которых изображена характерная газодинамическая 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 (частота 10^4 кадров/с, время выдержки $5 \cdot 10^{-6}$ с). На снимках видно, что за фронтом УВ располагается область течения, имеющего периодическую ячеистую структуру. Данная структура формируется в ударной трубе с конфузуром и сохраняется на некотором расстоянии после выхода в открытое пространство. Подобная картина течения представлена в [13].

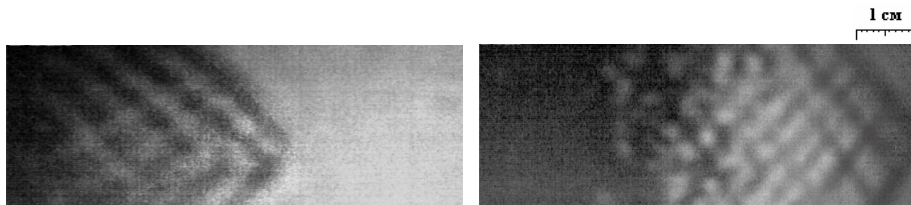


Рисунок 6 – Шлирен-фотографии структуры течения при выходе УВ из ударной трубы в открытое пространство в последовательные моменты времени с интервалом 10^{-4} с

По положению фронта на кадрах и частоте съемки определена скорость УВ, составляющая 480 м/с в момент выхода УВ в открытое пространство, что удовлетворительно согласуется с результатами измерений с помощью пьезоэлектрических датчиков давления.

Раздел 4 посвящен математическому моделированию распространения УВ в цилиндрической трубе с сужением. Дана физическая постановка задачи: рассматривается течение, образующееся в длинной цилиндрической трубе с коническим сужением на выходе после срабатывания монтажного порохового патрона, находящегося в камере, расположенной на входе в трубу. Задача сводится к расчету нестационарного истечения из цилиндрической трубы (гильзы), заполненной пороховыми газами под высоким давлением, через небольшой цилиндрический канал (ствол) в заполненную воздухом цилиндрическую камеру с коническим сужением на выходе.

Приведены основные допущения, использованные при построении математической модели: задача осесимметричная (течение в стволе и в гильзе одномерное, а в объеме ударной трубы – двумерное); предполагается, что порох в гильзе сгорает мгновенно; задача решается без учета молекулярных механизмов переноса; продукты сгорания пороха и воздух описываются в рамках модели политропного газа, показатели адиабаты их считаются известными и постоянными. Их смесь также есть совершенный газ, показатель адиабаты которого зависит от массовой концентрации компонент [16]:

$$\gamma = 1 + \left[cM_p + (1-c)M_a \right] \left[cM_p / (\gamma_a - 1) + (1-c)M_a / (\gamma_p - 1) \right]^{-1}$$
, где M_i – молярная масса, γ – показатель адиабаты, c – массовая концентрация воздуха, индекс a отнесен к параметрам воздуха, индекс p – к параметрам пороховых газов ($\gamma_a = 1,41$; $\gamma_p = 1,27$; $M_a = 0,029$ кг/моль; $M_p = 0,03$ кг/моль [11]).

На основе интегральных законов сохранения массы импульса и энергии [11] с учетом принятых допущений предложена математическая модель исследуемых процессов. Для камеры ударной трубы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \iint_S y \rho dx dy + \int_{\Gamma} y \rho (u dy - v dx) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S y \rho u dx dy + \int_{\Gamma} y [\rho u (u dy - v dx) + p dy] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S y \rho v dx dy + \int_{\Gamma} y [\rho v (u dy - v dx) - p dx] &= \iint_S p dx dy, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S y E dx dy + \int_{\Gamma} y (E + 2p)(u dy - v dx) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \iint_S y c dx dy + \int_{\Gamma} y c (u dy - v dx) &= 0, \quad E = \rho(2e + u^2 + v^2). \end{aligned}$$

Для гильзы и ствола:

$$\begin{aligned} \int_L \rho dx - \rho u dt = 0, \quad \int_L \rho u dx - (p + \rho u^2) dt &= 0, \\ \int_L E dx - (E + 2p) u dt = 0, \quad E = \rho(2e + u^2), \quad e = p/\rho(\gamma - 1), \end{aligned}$$

здесь Γ – замкнутый контур, ограничивающий произвольную площадку S в плоскости координат x, y ; ось x совпадает с осью симметрии и направлена в сторону открытого торца камеры; t – время; p – давление; ρ – плотность смеси; u, v – проекции вектора скорости, L – замкнутый контур, ограничивающий произвольную площадку в плоскости переменных t, x ; E – удвоенная полная энергия газа; e – удельная внутренняя энергия.

Температура в камере ударной трубы определялась на основе уравнения состояния для термически совершенного газа $T = pM/\rho R$,

$M = (c/M_a + (1-c)/M_p)^{-1}$, где T – температура газа; R – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса газовой смеси [11].

В качестве начальных условий в стволе и в камере задавались параметры невозмущенного воздуха при стандартных условиях, в гильзе они вычислялись по формулам [17]: $\rho_0 = m/\Omega$, $E_0 = 2Qm/\Omega$, $p_0 = E(\gamma_p - 1)/2$, где m – масса сгоревшего пороха ($m = 0,38$ г), Q – удельная теплота сгорания пороха ($Q = 2728,9$ Дж/г), Ω – объем гильзы.

Граничные условия: на стенках камеры, гильзы и ствола ставилось условие непротекания, на выходе из камеры задавалось условие отсутствия обратного влияния на поток [18]: $\partial p/\partial x = \partial \rho/\partial x = \partial u/\partial x = \partial v/\partial x = 0$, теплоотдача в стенку не учитывалась.

Поставленная задача решалась численно с помощью метода Годунова (схема первого порядка точности). Область решения разбивалась расчетной сеткой на $N_x \times N_y$ ячеек, количество узлов сетки выбиралось из условия неизменности результатов при уменьшении шага, шаг по времени задавался в соответствии с критерием Куранта. Тестирование алгоритма осуществлялось с помощью задачи о течении идеального газа ($\gamma = 1,41$) в радиально-коническом сопле, а также задачи обтекания равномерным сверхзвуковым потоком идеального газа ($M = 5$) тела типа конус, затупленный по сфере. Тесты подтвердили применимость метода для решения поставленной задачи.

При численном моделировании были заданы значения физических и геометрических параметров, соответствующие экспериментам на ударной трубе, получены распределения газодинамических параметров в ударной трубе с коническим конфузуром ($N_x = 400$, $N_y = 40$). На рисунке 7 представлена визуализация распределения давления в различные моменты времени.

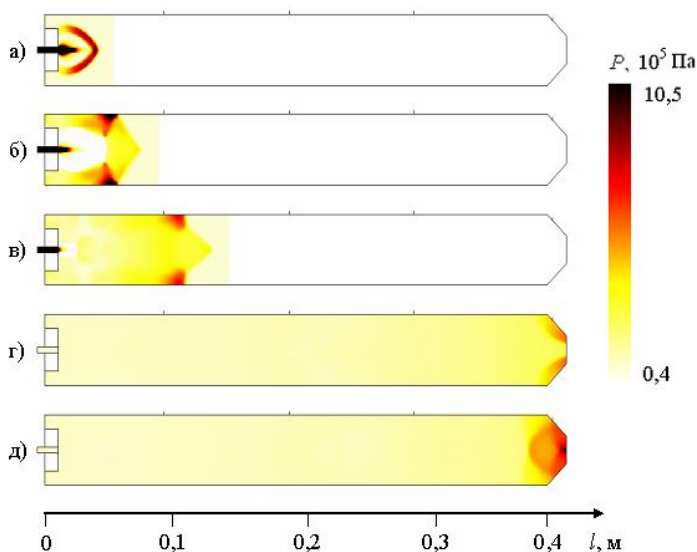


Рисунок 7 – Распределение давления в ударной трубе в последовательные моменты времени:
 а) $t = 0,2 \cdot 10^{-4}$ с; б) $t = 0,5 \cdot 10^{-4}$ с; в) $t = 1,1 \cdot 10^{-4}$ с; г) $t = 5,9 \cdot 10^{-4}$ с; д) $t = 6,4 \cdot 10^{-4}$ с

В результате выстрела монтажного порохового патрона на срезе ствола в начальный момент образуется почти полусферическая ударная волна (рисунок 7-а). После ее отражения от стенок ударной трубы возникает типичная сверхзвуковая неизобарическая струя в ограниченном пространстве (рисунок 7-б). Для данного типа течения характерно наличие в потоке сложной ударно-волновой структуры. Скачки периодически отражаются от стенок камеры (рисунок 7-в). Падение давления в гильзе в конечном итоге приводит к

исчезновению и вырождению струйного течения вблизи среза гильзы (рисунок 7-г). Интенсивность УВ со временем понижается, однако, при подходе ударно-волновой структуры к конической части (рисунок 7-д), реализуется маховское (нерегулярное) отражение скачков от стенок, что приводит к резкому повышению давления.

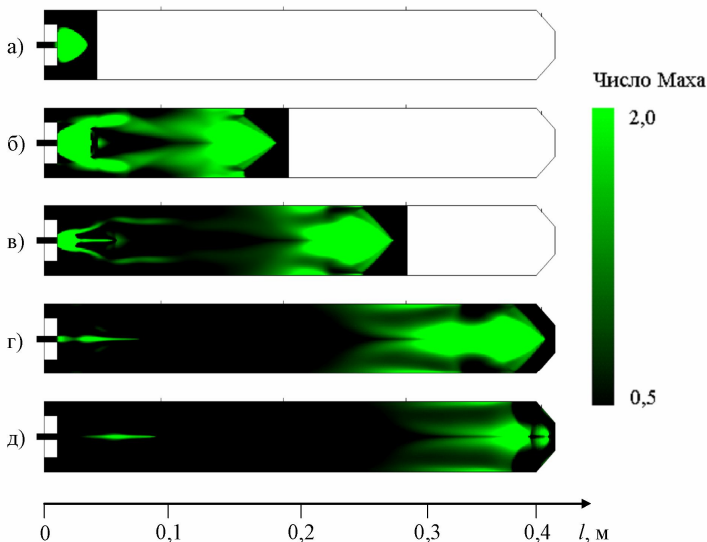


Рисунок 8 – Распределение числа Маха в потоке в последовательные моменты времени:

а) $t = 0,1 \cdot 10^{-4}$ с; б) $t = 1,1 \cdot 10^{-4}$ с; в) $t = 1,8 \cdot 10^{-4}$ с; г) $t = 2,8 \cdot 10^{-4}$ с; д) $t = 3,5 \cdot 10^{-4}$ с

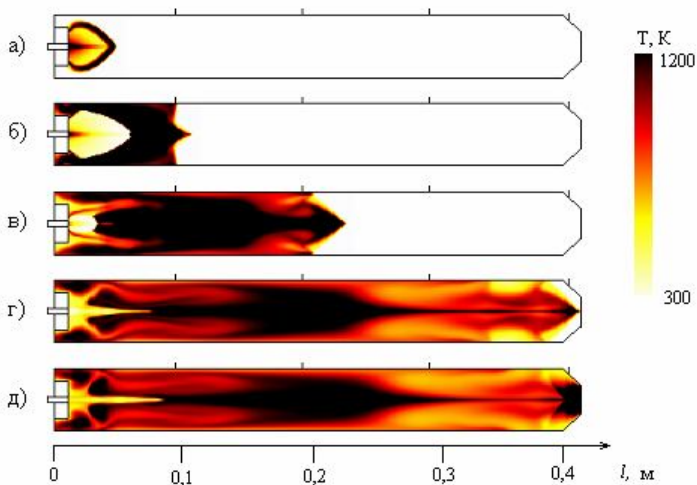


Рисунок 9 – Поле температуры в ударной трубе в последовательные моменты времени:

а) $t = 0,1 \cdot 10^{-4}$ с; б) $t = 0,6 \cdot 10^{-4}$ с; в) $t = 1,4 \cdot 10^{-4}$ с; г) $t = 2,8 \cdot 10^{-4}$ с; д) $t = 3,3 \cdot 10^{-4}$ с

На рисунках 8 и 9 представлены распределения числа Маха и температуры в камере ударной трубы в последовательные моменты времени. Максимальная температура наблюдается в центре потока и в области конфузора. На выходе из ударной трубы температура газа достигает 1000 К.

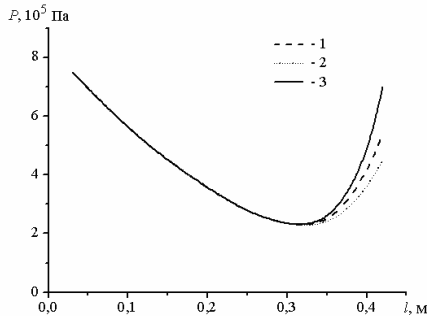


Рисунок 10 – Давление на стенке канала при различных значениях угла раствора конфузора: 1 – $\varphi = 35^\circ$; 2 – $\varphi = 45^\circ$; 3 – $\varphi = 55^\circ$

На рисунке 10 представлены результаты расчета давления на стенке канала при различных углах раствора конфузоров ($d_1 = 0,02$ м). Видно, что в области конфузоров происходит резкое увеличение давления. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рисунок 5). Наибольшее различие наблюдается в области конфузора. Это связано с тем, что датчик давления был расположен на срезе насадка, на его показания влияли процессы ослабления ударной волны при выходе в открытое пространство. Численные результаты не включают описания этих процессов и относятся только к течению в ограниченном пространстве ударной трубы с конфузуром.

В разделе 5 представлены результаты экспериментального исследования воздействия УВ на фронт низового лесного пожара в лабораторных условиях.

В п. 5.1 приводится описание полезной модели устройства для локализации и тушения низовых лесных пожаров [15].

В п. 5.2 изложены результаты лабораторных экспериментов по воздействию УВ на фронт низового лесного пожара. Исследования проводились с помощью экспериментального комплекса (рисунок 11).

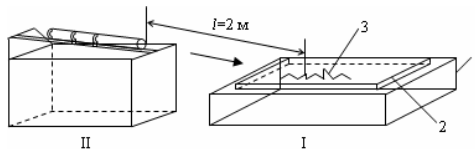


Рисунок 11 – Схема экспериментального комплекса для лабораторного моделирования тушения низового лесного пожара ударными волнами: огневой стенд для моделирования низовых лесных пожаров – I, основание – 1, кювета – 2, слой грунта – 3; генератор УВ – II (схема показана на рисунке 3)

В качестве элементов ЛГМ на огневом стенде были использованы опавшая листва березы, осины, тополя, хвоя сосны, ели и кедра, а также тонкие веточки деревьев с небольшим включением травы. Относительное влагосодержание составляло $0,07 \div 0,13$, что ниже критического значения, при котором возникают лесные пожары [1]. Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На огневом стенде на поверхности грунта выкладывались ЛГМ с плотностью укладки, соответствующей натурным условиям, толщина слоя ЛГМ ($0,06 \div 0,08$) м. Генератор УВ располагался на безопасном расстоянии 2 м от огневого стенда [19]. Высота пламени не превышала 0,5 м. Тушение моделируемого низового лесного пожара осуществлялось с помощью генератора УВ.



(а)



(б)

Рисунок 12 – Фотографии огневого стенда: в момент горения ЛГМ (а) и после газодинамического воздействия на очаг горения (б)

На рисунке 12-а приведена фотография огневого стенда в момент горения ЛГМ. Проведенные полунатурные испытания показали, что использование конического конфузора с оптимальными геометрическими параметрами обеспечивает существенное повышение эффективности газодинамического воздействия на горение ЛГМ (рисунок 12-б). Один «выстрел» с использованием генератора УВ без конфузора с расстояния 1 м обеспечивал локальное прекращение горения ЛГМ на площади с радиусом ($0,15 \div 0,2$) м. Использование конфузора оптимальной формы позволяло достичь такого же эффекта, но с расстояния 2 м, которое является минимальным по требованиям безопасности проведения работ по борьбе с лесными пожарами. Результаты экспериментов подтвердили эффективность и надежность предложенного способа тушения низовых лесных пожаров с помощью высокоскоростного потока.

В заключении сформулированы основные научные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. Созданы оригинальные установки и стенды для экспериментального исследования динамики УВ и их воздействия на фронт низового лесного пожара (в лабораторных условиях).

2. На основе выполненного в лабораторных условиях исследования динамики УВ, распространяющихся в смеси воздуха с продуктами пиролиза ЛГМ различной концентрации, показана немонотонная зависимость повышения

давления в УВ от объемной концентрации продуктов пиролиза ЛГМ, на используемой установке получено максимальное повышение интенсивности УВ (на 25%) при протекании химических реакций в смеси с объемной концентрацией продуктов пиролиза ЛГМ $C = 0,5$.

3. В результате проведенного экспериментального исследования динамики УВ в ударной трубе с коническим конфузуром проанализировано влияние геометрических параметров на интенсивность УВ, решена оптимизационная задача и найдены значения параметров, обеспечивающие максимальное повышение давления в УВ на выходе из ударной трубы за счет отражений от стенок конфузурора.

4. В рамках математической модели осесимметричного нестационарного течения сжимаемого газа в ударной трубе с коническим конфузуром выполнены численные расчеты распределений газодинамических параметров, проанализировано влияние геометрических факторов на параметры УВ, теоретически обоснован способ повышения эффективности ударно-волновых устройств для борьбы с лесными пожарами.

5. Проведенные лабораторные исследования по газодинамическому воздействию на очаг горения ЛГМ показали, что использование ударных труб с коническими конфузурорами оптимальной формы позволяет значительно повысить эффективность и безопасность ударно-волновых устройств для борьбы с низовыми лесными пожарами.

6. На основе проведенных комплексных экспериментальных и теоретических исследований создана полезная модель ударно-волнового устройства для локализации и тушения лесных пожаров, показаны и обоснованы практические преимущества предложенной конструкции.

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. Пат. 2033826 СИ Россия, МКИ 6 А 62 С 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. – 4 с.

3. Shock-wave effect on the fire / I. S. Anufriev [et.al.] // Proceedings. Seventh International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. St. Petersburg, Russia, July 7–11, 2008. – St. Petersburg, 2008. – Vol. 3. – P. 284-289.

4. Взаимодействие ударных волн с продуктами пиролиза лесных горючих материалов / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман // Экологические системы и приборы. – 2005. – №7. – С. 38-40.

5. Ковалев Ю. М. Математическое и физическое моделирование инициирования детонации в твердых взрывчатых веществах и распространение ударных волн в пологе леса при лесных пожарах : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / Ю. М. Ковалев. – Томск, 1987. – 195 с.

6. 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.
7. 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.
8. Ляхов В. Н. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций / В. Н. Ляхов, В. В. Подлубный, В. В. Титаренко. – М. : Машиностроение, 1989.
9. Ударные и детонационные волны. Методы исследования / И. Ф. Кобылкин [и др.]. – М. : Изд-во физ.-мат. лит., 2004. – 375 с.
10. Баум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, К. П. Станкович, Б. И. Шехтер. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 800 с.
11. Хоменко Ю. П. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах / Ю. П. Хоменко, А. Н. Ищенко, В. З. Касимов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. – 256 с.
12. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов [и др.]. – М. : Наука, 1976. – 400 с.
13. Альбом течений жидкости и газа : пер. с англ. / сост. М. Ван-Дайк. – М. : Мир, 1986. – 184 с., ил.
14. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика : учеб. руководство для вузов / Г. Н. Абрамович : в 2 ч. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – Ч. 2. – 304 с.
15. Пат. 80755 Российская Федерация, МПК А 62 С 3/02. Устройство для локализации и тушения лесных пожаров / А. Н. Голованов, Ю. П. Панкратов, А. Ф. Цимбалюк, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман, А. А. Клочкиков ; заявитель Том. гос. ун-т ; пат. поверенный Ануфриев И. С. – № 2006143913/22 ; заявл. 11.12.2006 ; опубл. 27.02.2009, Бюл. № 6.
16. Козлов Е. А. Практическая газодинамика внутрикамерных процессов в твердотопливных ракетных двигателях / Е. А. Козлов, А. Б. Ворожцов, С. С. Бондарчук // Известия ВУЗов. Физика. – 1992. – № 8. – С. 104-113.
17. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества / А. Г. Горст. – М. : Машиностроение, 1972. – 208 с.
18. Ильгамов М. А. Неотражающие условия на границах расчетной области / М. А. Ильгамов, А. М. Гильманов. – М. : Физматлит, 2003. – 240 с.
19. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. – М. : Гослесхоз СССР, 1976. – 110 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Взаимодействие ударных волн с продуктами пиролиза лесных горючих материалов / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман, А. А. Колесников // Сопряженные задачи механики, информатики и экологии : материалы междунар. конф. – Томск, 2004. – С. 64-65.

2. Экспериментальное исследование взаимодействия ударных волн с продуктами пиролиза лесных горючих материалов / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман, А. А. Колесников // XIII Симпозиум по горению и взрыву : тез. докл. – Черногоровка, 2005. – С. 76-77.

3. Голованов А. Н. Экспериментальное исследование взаимодействия ударных волн с продуктами пиролиза лесных горючих материалов / А. Н. Голованов, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках : тр. XV школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А. И. Леонтьева. – М., 2005. – Т. 1. – С. 312-314.

4. Экспериментальное исследование генерации интенсивных ударных волн и новые способы борьбы с лесными пожарами / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман // Лесные и степные пожары : возникновение, распространение, тушение и экологические последствия : материалы 6-ой междунар. конф. – Томск, 2005. – С. 33-34.

5. Взаимодействие ударных волн с продуктами пиролиза лесных горючих материалов пожарами / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман // Экологические системы и приборы. – 2005. – № 7. – С. 38-40.

6. Ануфриев И. С. Экспериментальное исследование пересжатых ударных волн // Физика и химия наноматериалов : материалы междунар. школы-конф. молодых ученых. – Томск, 2005. – С. 292-295.

7. Ануфриев И. С. Экспериментальное исследование пересжатых ударных волн // VI Всерос. конф. молодых ученых по математ. моделированию и информационным технологиям (с участием иностранных ученых) : тез. докл. – Кемерово, 2005. – С. 29.

8. Взаимодействие ударных волн с элементами лесных горючих материалов / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман // Междунар. конф. «Пятые Окуневские чтения» : тез. докл. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2006. – С. 58-59.

9. Математическое и физическое моделирование ударных волн при прохождении через конфузорный участок ударной трубы / А. Н. Голованов, О. В. Шарыпов, А. Ф. Цимбалюк, И. С. Ануфриев, А. А. Клочков // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : материалы междунар. конф. – Томск, 2007. – С. 39-40, 228-229.

10. Математическое и физическое моделирование ударных волн при их прохождении через конфузорный участок ударной трубы / А. Н. Голованов, О. В. Шарыпов, А. Ф. Цимбалюк, И. С. Ануфриев, А. А. Клочков // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : избр. докл. 7-ой междунар. науч. конф. – Томск, 2007. – С. 228-234.

11. Ануфриев И. С. Усиление ударных волн при прохождении через конфузорный участок ударной трубы / И. С. Ануфриев, А. А. Клочков // Студент и научно-технический прогресс : материалы XLV междунар. науч. студенческой конф. – Новосибирск, 2007. – С. 19-20.

12. Ануфриев И. С. Математическое и физическое моделирование динамики ударных волн при их прохождении через конфузорный участок ударной трубы / И. С. Ануфриев, А. А. Клочков // Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии : тез. докл. Всерос. школы-семинара молодых ученых. – Новосибирск, 2007. – С. 7-8.

13. Ануфриев И. С. Экспериментальное исследование динамики ударных волн при их прохождении через конфузорный участок ударной трубы // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф : материалы 7-ой междунар. конф. – Томск, 2008. – С. 11-12.

14. Математическое моделирование процессов отражения ударных волн при их отражении от конической поверхности / И. С. Ануфриев, А. Н. Голованов, О. В. Шарыпов, А. Ф. Цимбалюк // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф : материалы 7-ой междунар. конф. – Томск, 2008. – С. 12-13.

15. Shock-wave effect on the fire / I. S. Anufriev [et.al.] // Proceedings. Seventh International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. St. Petersburg, Russia, July 7–11, 2008. – St. Petersburg, 2008. – Vol. 3. – P. 284-289.

16. Ануфриев И. С. О повышении эффективности средств тушения низовых лесных пожаров за счет применения методов ударно-волнового воздействия // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики : тез. докл. X Всерос. школы-конф. молодых ученых. – Новосибирск, 2008. – С. 15-16.

17. Пат. 80755 Российская Федерация, МПК А 62 С 3/02. Устройство для локализации и тушения лесных пожаров / А. Н. Голованов, Ю. П. Панкратов, А. Ф. Цимбалюк, И. С. Ануфриев, А. М. Лоцман, А. А. Клочков ; заявитель Том. гос. ун-т ; пат. поверенный Воронин В. Н. – № 2006143913/22 ; заявл. 11.12.2006 ; опубл. 27.02.2009, Бюл. № 6.

18. О влиянии ударных волн на фронт низового лесного пожара / А. Н. Голованов, О. В. Шарыпов, А. Ф. Цимбалюк, И. С. Ануфриев // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : материалы 8-й Всерос. конф. с участием зарубежных ученых. – Томск, 2009. – С. 32-34.

19. Shock-wave effect on the forest fire front / I. S. Anufriev [et.al.] // Abstracts of Sixth Mediterranean Combustion Symposium. – Porticcio-Ajaccio, Corsica-France, 2009. – P. 151.

20. Динамика ударных волн в осесимметричных каналах с конфузорами / И. С. Ануфриев, А. Н. Голованов, А. Ф. Цимбалюк, О. В. Шарыпов // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. : Физика. – 2009. – Т.4, вып. 2. – С. 13-18.