

**На правах рукописи**



**Строкатов Антон Анатольевич**

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГНЕННЫХ И  
ТЕПЛОВЫХ СМЕРЧЕЙ**

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2007

Диссертация выполнена на кафедре физической и вычислительной механики государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Томского государственного университета и в лаборатории распространения волн Института оптики атмосферы СО РАН.

Научный руководитель: доктор технических наук  
Голованов Александр Николаевич

Научный консультант: кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Цык Рувим Шахнович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Самсонов Виктор Петрович

кандидат технических наук,  
доцент Руденко Михаил Георгиевич

Ведущая организация: Институт теплофизики СО РАН  
им. С.С. Кутателадзе  
(г. Новосибирск)

Защита состоится 16 мая 2007 года 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, ауд. 119 (главный корпус ТГУ).

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

Автореферат разослан «\_9\_» апреля 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета д.т.н.



Ю.Ф. Христенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Огненные и тепловые смерчи являются примерами экологических катастроф [1-3]. Они наносят огромный ущерб окружающей среде и приводят к многочисленным разрушениям и человеческим жертвам. В настоящее время в мире ежегодно регистрируется около 1000 смерчей. Если тепловые смерчи (вихри типа торнадо) достаточно частые явления, то огненные смерчи довольно редкие природные явления, которые возникают при крупных лесных пожарах, массовых пожарах в городах и авариях на крупных пожароопасных объектах нефтехимии, лесоперерабатывающей промышленности и других. Последствиями атомной бомбардировки Хиросимы (1945 г.) и массированных бомбежек Гамбурга (1943 г.) и Дрездена (1945 г.) военно-воздушными силами США во время второй мировой войны стали исключительно опасные продолжительные неуправляемые пожары. После множественных одновременных возгораний в условиях города, плотно насыщенного горючими материалами, пламена сливались, образуя достаточно однородно горящую площадь, вследствие чего возникли огненные смерчи [4, 5-7]. Огненные смерчи наблюдались также при бомбардировках городов Касселя и Дармштадта, а в 1926 году в США в Калифорнии в результате удара молнии в нефтехранилище.

Механизм возникновения и эволюции в смерче затруднительно исследовать в природных условиях, так как это явление потенциально опасно. Лабораторными исследованиями смерчей-вихрей в газах и в жидкостях занимаются давно, как в нашей стране, так и за рубежом [8, 9]. Однако даже самые интенсивные и локализованные атмосферные вихри торнадо до сих пор мало изучены. В литературе недостаточно работ, посвященных экспериментальному исследованию огненных смерчей. Поэтому моделирование и исследование огненных и тепловых смерчей в лабораторных условиях является актуальной задачей.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования диссертационной работы являются огненные и тепловые смерчи. Предмет исследования – анализ причин, приводящих к возникновению огненных и тепловых смерчей, выяснение условий развития, устойчивости и восприимчивости смерчей к малым энергетическим возмущениям.

**Методы исследования.** В качестве основных методов использовались методы физико-математического моделирования и статистического анализа данных. Методологической базой исследования послужили работы [8-23].

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является проведение комплекса экспериментальных исследований огненных и тепловых смерчей в лабораторных условиях и сравнение полученных результатов с натурными явлениями. Исходя из указанной цели исследования, решались следующие задачи:

1. Обзор публикаций и создание экспериментальных установок для моделирования огненных смерчей в лабораторных условиях несколькими независимыми способами.
2. Проведение экспериментальных исследований, выбор критериев подобия процессов течения и теплообмена газа в огненных и тепловых смерчах и их численное определение.
3. Сравнительный анализ огненных смерчей, полученных при сгорании разных типов горючих материалов.
4. Выяснение механизма формирования, функционирования и устойчивости смерчей.
5. Сравнение полученных физических моделей огненных и тепловых смерчей с натурными явлениями и теоретическими исследованиями.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработаны и созданы стенды для моделирования огненных и тепловых смерчей в открытом пространстве в лабораторных условиях.
2. Выяснен механизм течения и теплообмена газа в огненных и тепловых смерчах на основании экспериментальных данных по гидродинамической структуре течения газа в вихрях.
3. Рассчитаны и определены критерии возникновения и эволюции огненных и тепловых смерчей.
4. Исследованы восприимчивости смерчей к малым энергетическим возмущениям – акустическим колебаниям.

**На защиту выносятся следующее:**

1. Конструкции и установки, на которых несколькими независимыми способами были получены огненные и тепловые смерчи в открытом пространстве. Возможность физического моделирования смерчей в лабораторных условиях.
2. Экспериментальные результаты определения термогазодинамических параметров течения газа и теплообмена в огненных и тепловых смерчах на основе использования упомянутых ранее установок.
3. Механизм процесса формирования и устойчивости смерчей.
4. Возможность управления и разрушения теплового смерча малыми энергетическими возмущениями, акустическими колебаниями в лабораторных условиях.

**Достоверность.** Достоверность экспериментальных результатов работы обеспечена использованием различных независимых методик определения термогазодинамических параметров в смерчах, статистической обработки результатов измерений и их сравнением с некоторыми экспериментальными и теоретическими данными российских и зарубежных авторов, опубликованными в научной литературе и в том числе данными результатов наблюдений за реальными массовыми пожарами в Гамбурге [4].

**Практическая значимость полученных результатов.** В диссертационной работе, проведен комплекс экспериментальных исследований

огненных и тепловых смерчей, часто возникающих в приземном слое атмосферы, при различных природных (лесные и степные пожары) и техногенных (горение нефти, разлитой по различным типам подстилающей поверхности и горючего газа, при разрыве нефте- и газопроводов) катастрофах с учетом взаимосвязи движения горючих жидкостей и газов и их горения с образованием огненного столба, перемещающегося по подстилающей поверхности. В результате экспериментальных исследований смерчей построена физическая модель процесса и обнаружена восприимчивость течений газа в вихрях к воздействию акустических колебаний, направленных перпендикулярно к восходящему потоку. Найдены избирательные значения частот акустических колебаний, разрушающих тепловой смерч. Выявлены механизмы формирования и устойчивости вихрей этого класса течений, что позволит предложить новые способы борьбы с ними.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, представленных в диссертации, апробировались на 10 международных и региональных конференциях, в том числе Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (Горно-Алтайск, 2004), XI Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean optics. Atmospheric Physics” (Томск, 2004), XIII Симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 2005), 5<sup>th</sup> International Seminar on Flame Structure (Новосибирск, 2005), Международном научно-техническом симпозиуме “Образование через науку” (Калуга, 2005), IX Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и образование” (Томск, 2005), Международной конференции “Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия” (Иркутск, 2005), Международной научно-практической конференции “Снежинск и наука – 2006” (Снежинск, 2006), Международной конференции «Пятое Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2006). XIII Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics” (Томск, 2006).

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 3 статьи в центральной печати в журналах, рекомендованных ВАК. Автор был ответственным исполнителем гранта 130327 в ведомственной программе Министерства образования и науки РФ Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы», подпрограмма по разделу 3.3 «Развитие научно-исследовательской работы молодых преподавателей и научных сотрудников, аспирантов и студентов», проект «Экспериментальное исследование огненных смерчей», 2005 г., а также является исполнителем гранта РФФИ 05-01-00201-а «Математическое моделирование возникновения и распространения огненных смерчей», 2005-2007 гг.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы из 95 наименований на русском и иностранных языках. Работа содержит 132 страницы текста, 40 рисунков и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** формулируется актуальность работы, цель и задачи исследования, излагается краткое содержание работы. Отражена научная новизна работы и практическая значимость результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** дается краткий обзор как российских, так и зарубежных ученых по проблеме формирования и функционирования вихрей типа торнадо и огненных смерчей, схожих друг с другом [1-19]. Обобщены немногочисленные статистические данные о смерчах. Рассмотрены основные модели вихревых структур (модели Рэнкина и Бюргерса), которые качественно отражают основные особенности концентрированных вихрей [15].

**Глава 2.** В главе «Экспериментальные установки и методики определения термогазодинамических параметров» описаны экспериментальные установки, разработанные для моделирования огненных и тепловых смерчей.

Моделирование огненных смерчей осуществлялось в лабораторных условиях с помощью трех независимых способов, основанных на закрутке восходящего конвективного потока продуктов сгорания нефти (моделирование горения нефти разлитой по поверхности почвы), конструкций из дерева (моделирование пожаров в населенных пунктах) и лесных горючих материалов (моделирование лесных пожаров). Конвективный поток закручивался вращением нижнего основания подложки с горючими материалами, сверху вращающимися лопастями вентилятора и сбоку с помощью воздушного потока, генерируемого аэродинамической трубой МТ-324.

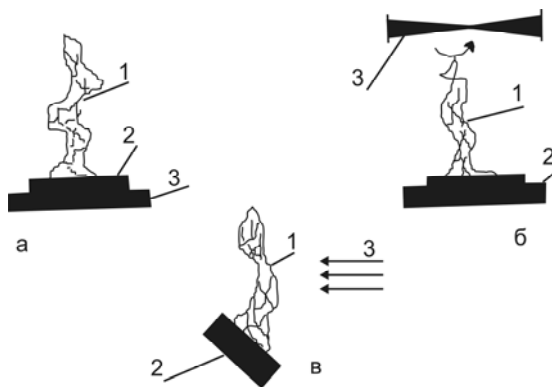


Рисунок 1 – Принципиальные схемы экспериментальных установок

Принципиальные схемы установок показаны на рисунке 1. Рисунок 1,а соответствует тангенциальной закрутке смерча – 1, образованного продуктами горения, размещенными на подложке – 2, за счет вращения с угловой скоростью

ω основания конструкции – 3. На рисунке 1,б показана закрутка смерча – 1, образованного продуктами горения, размещенными в подложке – 2, с помощью вращения вентилятора – 3, расположенного в верхней части факела. Подложка с горючим материалом при этом оставалась неподвижной. На рисунке 1,в смерч – 1 закручивается потоком воздуха – 3 в направлении перпендикулярном оси симметрии факела. Подложка с горючими материалами – 2 расположена под углом α к направлению вектора скорости воздушного потока.

Моделирование тепловых смерчей осуществлялось в лабораторных условиях с помощью экспериментальной установки, основанной на закрутке восходящего конвективного потока вращением нижнего основания. Установка была создана, для исследования восприимчивости течения газа в смерче к акустическим колебаниям и влияния малых возмущений на устойчивость смерча, что позволило рассмотреть вопросы об усилении и подавлении турбулентных пульсаций газа в тепловом смерче. Диапазон частот акустических колебаний варьировался от (10÷5000) Гц, интенсивность звука составляла  $I = (55÷65)$  дБ.

С помощью контактных и бесконтактных методов определялись газодинамические и тепловые параметры огненных и тепловых смерчей.

В процессе проведения экспериментов после образования огненного смерча контролировалась температура газа  $T_0$  термоэлектрическим методом с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром спая  $2 \cdot 10^{-4}$  м.

Величина теплового потока  $q$  определялась известным экспоненциальным методом, основанным на измерении скорости нагрева чувствительного элемента датчика теплового потока. Теплоизолированный чувствительный элемент датчика выполнен из материала с высоким значением коэффициента теплопроводности (из меди). Толщина чувствительного элемента  $2 \cdot 10^{-3}$  м, диаметр  $2 \cdot 10^{-2}$  м.

$$q = \rho c_p \delta \frac{dT}{dt_0}, \quad (1)$$

где  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\delta$  – плотность, теплоемкость и толщина чувствительного элемента.

Характерные размеры чувствительного элемента определялись из условий:

$$\frac{r}{D} \ll 1, \quad Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} \ll 1, \quad Fo = \frac{a_s \tau}{\delta^2} \gg 0,35, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр чувствительного элемента;  $\lambda$ ,  $a_s$  – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности меди;  $\tau$  – характерное время изучаемого процесса;  $Bi$ ,  $Fo$  – числа Био и Фурье.

Линейная скорость газа  $v_z$  в направлении оси  $Oz$  и тангенциальная  $v_\tau$ , измерялись термоанемометрическим методом, пневмометрическим методом с помощью трубки Пито диаметром  $2 \cdot 10^{-3}$  м и регистрацией траекторий движения мелкодисперсных частиц алюминия, вводимых в поток в направлении тангенциальной скорости вращения вихря (Рисунок 2).

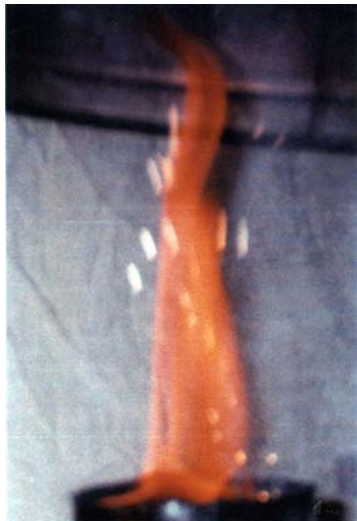


Рисунок 2 – Треки светящихся алюминиевых частиц в огненном смерче

Время экспозиции фоторегистрирующего устройства  $\tau = 0,008$  с. Обработка фотопленки осуществлялась на микрофотометре МФ-2. Скорость газа  $\bar{v}$  в смерче определялась как  $\bar{v} = \frac{l}{\tau}$ , где  $l$  – длина трека светящейся

частицы алюминия;  $\bar{v} = v_z + v_\tau$ . Также регистрация траектории движения частиц осуществлялась с помощью цифрового фотоаппарата марки Pentax Optio S45 после чего кадры обрабатывались на компьютере с использованием программы Adobe Photoshop.

Определение скорости горения  $\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta \tau}$ , где  $\Delta m$  – убыль массы,  $\Delta \tau$  – время горения

нефти, лесных горючих материалов и фрагментов зданий, осуществлялось с помощью их взвешивания и измерения

времени горения  $\Delta \tau$  секундомером типа СЭЦ. Дополнительно проводилась регистрация процессов горения и образования огненных смерчей телевизионной камерой Sony.

Описываются оптические методы определения влияния высокотемпературной среды на распространение излучения и методика определения яркостной температуры в огненном смерче с помощью тепловизора АГА-780 SW.

При обработке результатов измерений применены методы теории планирования эксперимента. Суммарные погрешности определения параметров не превышали  $\delta T \leq 4,8\%$ ,  $\delta q \leq 9,2\%$ ,  $\delta v \leq 9,0\%$  (термоанемометр),  $\delta v \leq 7,9\%$  (треки светящихся частиц),  $\delta v \leq 6,1\%$  (насадок Пито-Прандтля),  $\delta m \leq 2,3\%$ ,  $\delta \tau \leq 1,0\%$ . По результатам измерений (3–5 опытов) рассчитывались доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,95.



**Глава 3.** Глава «Физическое моделирование огненных смерчей» посвящена экспериментальному исследованию огненных смерчей в лабораторных условиях и сравнению полученных данных с натурным явлением. Дано описание физических процессов, происходящих в смерчах. Выбраны параметры, определяющие класс явления:

$$T_0, v_\tau, v_z, r, H, \rho, \mu, \lambda, c_p, Q, g, \quad (3)$$

где  $T_0$  – температура на оси симметрии смерча;  $v_\tau$  – тангенциальная составляющая скорости;  $v_z$  – скорость газа в вертикальном направлении;  $r$  – радиус смерча;  $H$  – высота смерча;  $\rho$  – плотность;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $Q$  – объемное тепловыделение;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Выяснены, какие критерии подобия появляются при изучении течений газа в огненных смерчах. Из краткого литературного обзора следует, что механизм формирования и функционирования вихрей типа торнадо и огненных смерчей схожи друг с другом и определяется действием четырех сил: архимедовой подъемной силой, силы тяжести, трения и силы, обеспечивающей закрутку вихря. Отношение этих сил дает три критерия подобия рассматриваемой задачи: критерий Грасгофа  $Gr$ , Прандтля  $P_r$  и вращательный критерий  $F$  [8].

$$Gr = g\beta(T_0 - T_e)H^3/\nu^2, \quad P_r = \frac{\nu}{a}, \quad F = \frac{\nu H v_z}{\Gamma^2}, \quad (4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – коэффициент сжимаемости газа;  $T_0$  – температура на оси симметрии смерча;  $T_e$  – температура окружающего воздуха;  $h$  – характерный масштаб (высота смерча);  $\nu$  – кинематическая вязкость, которая бралась из работы [18];  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $v_z$  – скорость газа в вертикальном направлении;  $\Gamma = 2\pi r v_\tau$  – циркуляция скорости;  $r$  – радиус колоннообразного огненного смерча;  $v_\tau$  – тангенциальная составляющая скорости.

Для оценки мощности тепловыделения от продуктов сгорания введен критерий Остроградского, критерий, используемый для описания конвективных течений [24].

Критерий Остроградского:

$$Os = \frac{Qd^2}{\lambda T_0}, \quad Q = \frac{2}{S} \int_0^{\frac{d}{2}} q dy, \quad (5)$$

где  $Q$  – объемное тепловыделение,  $d$  – диаметр смерча,  $T_0$  — температура на оси смерча,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Исследованы изменения тепловых характеристик огненного смерча, приведены результаты измерений температур смерча в инфракрасной области излучения. Максимальная температура в смерче составляет 900÷1200К. Результаты измерений бесконтактного “тепловизионного” метода не противоречат данным, полученных контактным методом, с помощью хромель-алюмелевых термопар.

На основании проведенных экспериментальных исследований при использовании методики [25, 26], были получены значения плотности теплового потока. По результатам измерений с целью проверки достоверности и апробации работы [10] плотность теплового потока рассчитывалась по формуле:

$$q = \frac{A \cdot m \cdot Q_+}{\tau_0 \cdot S}; \quad (6)$$

где  $Q_+ = 46 \cdot 10^6$  Дж/кг – тепловой эффект реакции горения нефти,  $S$  – площадь горящей поверхности,  $\tau_0$  – время горения,  $A$  – согласующий множитель.

Показано, что плотность тепловых потоков, генерируемых смерчами в лабораторных условиях, согласуется с расчетными данными.

В результате измерений скоростей газа установлено, что на высоте (8-10)·10<sup>-2</sup> м существует вихрь, в котором тангенциальная скорость приблизительно одинакова, линейная вертикальная составляющая скорости при этом возрастает. Этот факт объясняется притоком массы воздуха из окружающего смерч пространства, что подтверждено измерением радиальной скорости газа с помощью термоанемометра. Спиралевидные треки частиц, регистрируемые с помощью цифрового фотоаппарата, показывают характер течения газа в смерче – наличие тангенциальной и вертикальной составляющей скорости газа.

Выявлены влияние закрутки потока на скорость горения образцов лесных материалов, а также изменения угловой скорости вращения смерча в зависимости от высоты кромки подложки для горючих материалов.

Кроме того, экспериментально исследованы геометрические размеры вихря в видимом диапазоне спектра, его смещения. Устойчивый вихрь при

открытом объеме возникал при ограниченной частоте вращения диска  $f = (1,1 \div 1,3)$  Гц. Время устойчивости 8-12 с. Необходимо отметить, что присутствует сильная прецессия (смещение и медленное вращение смерча со скоростью 0,1-0,15 Гц) оси смерча с отклонением от центра на расстояние до нескольких диаметров.

В ряде случаев, при моделировании огненных смерчей в ограниченном объеме основанием  $0,6 \times 0,6$  м и высотой 1,7 м, над вращающейся подложкой на высотах 0,4; 0,5 м располагалась неподвижная стальная круглая пластина диаметром 0,5 м и толщиной  $2 \cdot 10^{-3}$  м. В опытах температура этой пластины почти не менялась, что позволило моделировать действие слоя инверсии температуры атмосферы на огненный смерч.

Измерения показали, что в отсутствие препятствия сверху (стальной лист) огненный смерч в ограниченном пространстве формируется при скорости вращения диска  $\sim 3,8$  Гц. Изменение на  $\sim \pm 0,2 \div 0,4$  Гц приводит к срыву смерча и переходу к турбулентному горению.

Выяснено, что частота и диаметр смерча консервативны. При наличии препятствия сверху смерч становится более устойчивым, прецессия незначительна. С увеличением числа оборотов диаметр смерча увеличивается.

На основании полученных экспериментальных данных и уравнений (4) и (5), рассчитаны безразмерные критерии подобия (Таблица 1).

**Таблица 1**

Расчеты критериев подобия для огненного смерча

Тип установки	Gr, $10^7$	Pr	F	Os
Закрутка нижнего основания (подложки)	2,95	4,61	0,67	9,22
Закрутка сверху	3,27	4,2	0,74	7,96
Подложка в горизонтальном потоке	2,8	4,0	0,76	9,34

Близость значений критериев подобия (Gr = idem, Pr = idem, F = idem, Os = idem) для разных способов формирования смерча доказывает то, что формирование огненного смерча не зависит от способа закрутки газового потока и, что выбранные безразмерные величины являются критериями подобия решаемой задачи.

**Глава 4.** В главе «Физическое моделирование тепловых смерчей» рассматривается вопрос о формировании и поведении теплового смерча. Смерч возбуждался в открытом объеме закруткой нижнего основания. При моделировании теплового смерча варьировалась частота закрутки платформы  $f$ . Выяснена минимальная частота закрутки основания  $f$ . Смерч появлялся при  $f = 0,7$  Гц, однако был неустойчив. При увеличении  $f$  до 1,8 Гц тепловой смерч становился неустойчивым и распадался. Наиболее оптимальная частота

вращения, при которой возникал устойчивый смерч,  $f = 1,3$  Гц. Для визуализации смерча и определения его геометрических размеров в тепловой поток вводились частицы канифоли. Во всём диапазоне частоты вращения диаметр смерча менялся незначительно и составлял  $(1,5 \div 3,5) \cdot 10^{-2}$  м у основания, тогда как высота смерча при увеличении угловой скорости вращения основания возрастала от 0,3 м до 0,7 м. Согласно работы [15], рассчитывался эффективный радиус  $r_m$  для теплового смерча.

$$r_m = 2,242\sqrt{\nu/\alpha}, \quad (7)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $\alpha = \text{const}$ .

Анализ данных показал, что расчетные значения радиуса  $r_m$  совпадают с экспериментальными  $r$ , и полученный в лабораторных условиях тепловой смерч качественно соотносится с моделью вихря Бюргера [15].

В серии экспериментов при различных частотах вращения  $f$  контролировалась температура  $T_0$  на оси теплового смерча (Таблица 2).

**Таблица 2**

Значения температуры на оси теплового смерча при разных частотах вращения

<b>f, Гц</b>	<b>0,7</b>	<b>1,3</b>	<b>1,8</b>
<b>T<sub>1</sub>, К</b>	383	373	364
<b>T<sub>2</sub>, К</b>	376	382	360
<b>T<sub>3</sub>, К</b>	387	387	367
<b><math>\bar{T}</math>, К</b>	382	381	364

Здесь  $f$  – частота вращения смерча;  $T_i$  – температура на оси смерча;  $\bar{T}$  – среднее значение температур;  $n_j$  – число параллельных опытов,  $i=1 \div n_j$ .

С помощью методов теории планирования осуществлялась обработка результатов, построены матрицы планирования экспериментов. В качестве критерия оптимизации  $y$  была выбрана безразмерная комбинация температур (5), фактора  $x$  – частота вращения теплового смерча  $f$ .

$$y = \frac{T_0 - T_e}{T_e}, \quad (8)$$

где  $T_0$  – температура на оси смерча;  $T_e = 298\text{K}$  – температура окружающей среды.

Исследовались линейная и нелинейная модели, связывающие критерий оптимизации с управляемым фактором:

$$y = b_0 + b_1x, \quad (9)$$

$$y = a \cdot x^n, \quad (10)$$

и выясняли, как они описывают зависимость температуры в тепловом смерче от частоты вращения  $f$ .

Показано, что коэффициент  $a$  в уравнении (10) является некой функциональной зависимостью параметров среды. Варьирование частоты вращения и температуры на оси симметрии приводит к изменению геометрических размеров теплового смерча:

$$y(H,r) = F(f,T). \quad (11)$$

Проводился сравнительный анализ экспериментальных данных с теоретическими. Рассматривалась полуэмпирическая формула зависимости угловой частоты вращения от геометрических характеристик смерча [16, 27, 28]:

$$f = \frac{a_*}{r} \sqrt{\frac{2gH(T_0 - T_e)}{T_e}}. \quad (12)$$

Здесь  $f$  – частота вращения платформы,  $r$  и  $H$  – радиус и высота колоннообразного огненного смерча;  $T_0$  – температура на оси смерча;  $T_e$  – температура окружающей среды;  $a_* = 1,29 \cdot 10^{-2}$  – эмпирическая константа соответствующая тепловому смерчу;  $a_* = 0,599 \cdot 10^{-2}$  – эмпирическая константа для огненного смерча.

Из выражения (9) видно, что с ростом высоты  $H$  величина  $f$  при прочих условиях растет, а с ростом  $r$  – убывает, что согласуется с априорными физическими соображениями и опытными данными. Показано, что формула (9) качественно отражает механизм формирования и эволюции смерча и подтверждается экспериментально в данной работе.

Частота вращения теплового смерча находилась в достаточно узком диапазоне и картина течения газа в тепловом смерче носила турбулентный

характер, поэтому исследовалось влияние акустических возмущений на возникновение и эволюцию теплового смерча. Показаны зависимости температуры свободноконвективного течения и теплового смерча по высоте, при воздействии на них акустических колебаний. Диапазоны варьируемых частот составляли (10÷5000) Гц. Доказано, что акустические возмущения приводят к искажениям термогазодинамической структуры течения газа в тепловом смерче. Существуют частоты акустического поля, при которых наблюдается явление разрушения теплового смерча. Полученные результаты сравнивались с данными на диаграмме устойчивости (Рисунок 3), полученной авторами работы [29] из анализа и решения уравнений Орра – Зоммерфельда для амплитудных функций возмущений [30] конвективной колонки в переменных:

$$G = 4 \left( \frac{Gr_z}{4} \right)^{1/4}, \quad (13)$$

$$\tilde{\omega} = \frac{32\pi \cdot \tilde{f} \cdot \rho \cdot z^3}{\mu \cdot G^3}, \quad (14)$$

где  $\rho$ ,  $\mu$  – плотность и коэффициент динамической вязкости газа

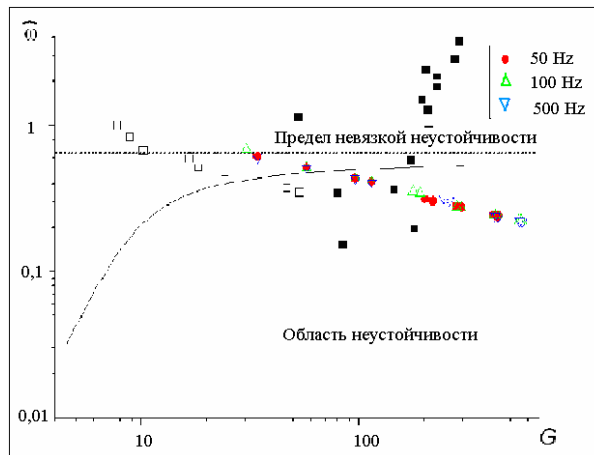


Рисунок 3 – Диаграмма устойчивости течения газа

Диаграмма устойчивости описывает движение возмущения с постоянной физической частотой  $\tilde{f}$  и позволяет определить изменение амплитуды возмущения при его движении вниз по потоку, т. е. при увеличении  $z$  (или  $G$ ). Нейтральная кривая отделяет области демпфирования и усиления возмущений в потоке. При малых значениях  $G$  возмущения демпфируются, эта область

отделена от области усиливающихся возмущений нейтральной кривой. Частота возмущений характеризуется безразмерной величиной  $\tilde{\omega}$ .

Темные квадратные значки на рисунке 3 – данные из работы [29], полученные для конвективной струи с вибрационными возмущениями источника нагрева, светлые – данные, полученные в работе [21] для конвективной струи под влиянием акустических возмущений. Остальные значки (треугольные и круглые значки) – результаты данной работы.

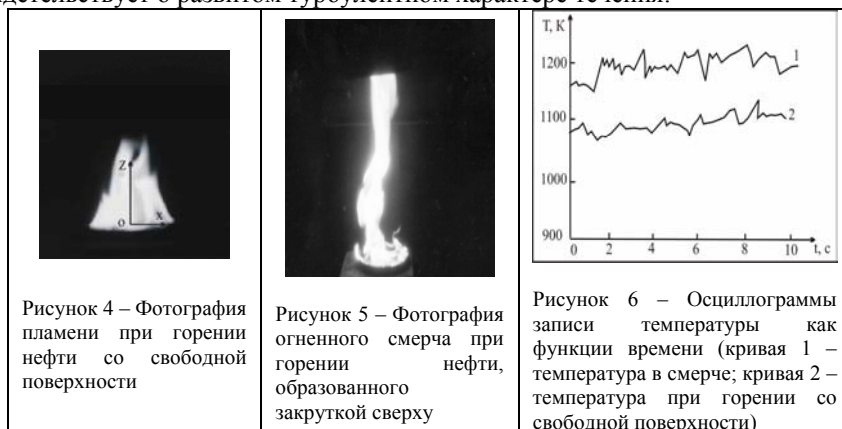
Анализ результатов на рисунке 3 показал, что основное течение в конвективной струе усиливает акустические колебания, частота которых не превышает некоторого предельного значения, но все они, смещаясь вниз по потоку, в конце концов, затухают, что подтверждается непосредственными измерениями и не противоречит предложенному механизму взаимодействия акустических колебаний с параметрами газа.

Визуализация гидродинамической картины течения газа в огненном и тепловом смерчах, результаты измерения термогазодинамических параметров, скорости горения и их анализ позволили сформулировать механизм формирования и эволюции смерчей.

Показано, что значения угловой частоты вращения для огненного смерча находятся в узком диапазоне  $f = (1,1 \div 1,3)$  Гц и не зависят от способа получения конвективной колонки. При  $f > 1,35$  Гц вихревые структуры распались и исчезали, горение становилось неустойчивым. Остановка вращения основания подложки и лопастей вентилятора приводила практически к мгновенному исчезновению огненного смерча. Следовательно, гироскопические эффекты, сопутствующие формированию вихрей торнадо, в огненном смерче отсутствуют. Огненный смерч не занимал всей площади горения элементов, а появлялся либо в центре, либо сбоку. Варьирование диаметра емкости для горючих материалов подтвердило это. Спиралевидные треки светящихся частиц показали – наличие тангенциальной и вертикальной составляющей скорости газа. Закономерности возникновения и эволюции огненных смерчей при закрутке газового потока в аэродинамической трубе те же, что и в первых двух случаях. Скорость набегающего потока находилась также в довольно узких диапазонах  $v_e = (0,9 \div 1,1)$  м/с. Угол наклона подложки  $\alpha$  к направлению вектора скорости воздушного потока составлял  $\alpha = (40 \div 50)^\circ$ . При  $\alpha < 40^\circ$ ,  $v_e < 0,9$  м/с огненный смерч не возникал, при  $\alpha > 50^\circ$ ,  $v_e > 1,2$  м/с становился неустойчивым.

Высота пламени без закрутки потока составляла  $(3 \div 5) \cdot 10^{-2}$  м (Рисунок 4). Изменением угловой частоты вращения подложки в пределах  $f = (1,1 \div 1,3)$  Гц удалось получить огненные смерчи образованные от продуктов сгорания нефти, лесных горючих материалов, элементов моделей зданий. Высота пламени при этом резко возрастала до  $(20 \div 80) \cdot 10^{-2}$  м (Рисунок 5). Температура горения в смерче на  $(100-150)$ К выше, чем в пламени (Рисунок 6). Повышение температуры горения в огненном смерче объясняется увеличением скорости диффузионного горения за счет увеличения скорости притока воздуха из

окружающего смерч пространства. Во всех точках поверхности наблюдались пульсации температуры в широком амплитудно-частотном спектре, что свидетельствует о развитом турбулентном характере течения.



Доказано, что структура образования огненного смерча менее устойчива, чем теплового смерча, так как он реализуется в более узком диапазоне частоты вращения. При этом большую роль играют стабилизирующие и дестабилизирующие факторы. Формированию смерча предшествует появление конвективной колонки, образованной источником тепла. Ее интенсивность зависит от величины плотности теплового потока  $q$ . Закрутка газового потока приводит к появлению центробежных сил, стремящихся увеличить ширину конвективной колонки, однако этого не происходит из-за уравнивания действия центробежных сил силами, обусловленных градиентом давления, направленным в радиальную зону смерча. Влияние градиента давления определяется степенью нагретости газа в центре, уменьшением его плотности и в конечном итоге значением плотности теплового потока от источника.

**В выводах** сформулированы основные научные результаты, полученные при подготовке и написании настоящей диссертационной работы.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. В лабораторных условиях тремя независимыми способами получены огненные и тепловые смерчи.
2. Используя методы теории подобия и размерностей и данные экспериментов, получены численные значения критериев подобия для процессов течения и теплообмена в огненных и тепловых смерчах.
3. Показано, что формирование и эволюция огненных смерчей не зависят от способа их получения и типа горючих материалов, а определяются значениями



плотности теплового потока, архимедовой подъемной силой, силой тяжести, трения и силой, обеспечивающей закрутку газа.

4. Показано, что процесс горения в огненном смерче носит диффузионный характер и зависит от скорости радиального притока окислителя из окружающего смерч пространства.

5. Характеристическими признаками возникновения огненного смерча являются резкий рост высоты факелы пламени и появление траекторий нагретых частиц продуктов сгорания, напоминающих винтовые линии с изменяющимся радиусом кривизны над очагом пожара.

6. Полученные обширные экспериментальные данные по термогазодинамическим параметрам позволили выяснить механизм процессов тепло- и массообмена в огненных и тепловых смерчах. Смерчи состоят из очага нагрева (горения), конвективной колонки и грибообразного облака нагретого газа в тепловом смерче и газообразных и дисперсных продуктов сгорания в огненном смерче.

7. В открытом пространстве огненные и тепловые смерчи существуют при угловой частоте вращения  $f = (1,1 \div 1,3)$  Гц (огненный смерч) и  $f = (0,7 \div 1,8)$  Гц (тепловой смерч), что свидетельствует о неустойчивости процессов течения газа и теплообмена в них. Доказано, что относительно устойчивый огненный смерч формируется в ограниченном объеме при скорости вращения диска  $\sim 3,8$  Гц.

8. Экспериментально обнаружено влияние акустических колебаний в диапазоне частот  $\tilde{f} = (10 \div 5000)$  Гц, фронт которых направлен перпендикулярно к восходящему потоку. Найдены избирательные значения частот акустических колебаний, разрушающих тепловой смерч. Разрушение теплового смерча связано с резонансными явлениями взаимодействия акустических колебаний и турбулентных пульсаций газа.

9. Механизмы формирования и эволюции огненного и теплового смерчей имеют как общие свойства, так и отличия: одинаковая физическая природа; узкий диапазон частот вращения; формированию смерча предшествует появление конвективной колонки, интенсивность которой зависит от величины плотности теплового потока  $q$ ; высокие градиенты давления, температуры и относительно низкие скорости течения газа.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури, смерчи. – М.: Наука, 1969. – 487 с.
2. *Наливкин Д.В.* Смерчи. – М.: Наука, 1984. – 111 с.
3. *Меркулов В.И.* Гидродинамика знакомая и незнакомая. – М.: Наука. ГРФМЛ, 1989. – 133 с.
4. *Кэрьер Г.Ф.,* Фендел Ф.Е., Фелдман П.С. Огненные смерчи // Теплопередача. – 1985. – Т.107, № 1. – С. 16-26.
5. *Brunswing H.,* Feuersturm uber Hamburg, Motorbuch, Stuttgart, Germany. – 1981.

6. *Schubert R.*, «Examination of the Building Density and Fuel Loading in the Districts Eimsbittel and Hammerbrook in the City of Hamburg as of July 1943» (translation), Project MU-6464, Stanford Research Institute. Menlo Park, Calif., 1969.
7. *Ebert C.H.V.*, «The Meteorological Factor in the Hamburg Fire Storm», *Weatherwise*, 1963. Vol. 16. – pp. 70-75.
8. *Интенсивные атмосферные вихри*/Под ред. Л. Бенгтссона, Дж Лайтхилла. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
9. *Snegirev A.Yu.*, Mardsen J.A., Fransis J., Makhviladze G.M. Numerical studies experimental observation of whirling flames // *International Journal Heat and Mass Transfer* 47. – 2004. – P. 2523-2539.
10. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 407 с.
11. *Гришин А.М.* Моделирование и прогнозирование катастроф. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. – 122 с.
12. *Гришин А.М., Катаева Л.Ю.* Математическая модель выброса жидкостей из прудов-отстойников под действием интенсивного атмосферного смерча и ее приложения. – Томск: Изд-во Томского университета, 1999. – 45 с.
13. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В.* Физическое моделирование огненных смерчей. // *Докл. АН.* – 2004. – Т. 395, № 2. – С. 196-198.
14. *Гришин А.М., Медюхина Е.В.* Приближенное аналитическое решение задачи об огненном смерче // *Сопряженные задачи механики, информатики и экологии: Материалы Международной конференции.* – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – С. 75.
15. *Алексеевко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.* Введение в теорию концентрированных вихрей. – Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2003. – 503 с.
16. *Никулин В.В.* Распад вертикального торнадоподобного вихря. // *ПМТФ.* – 1992. – № 4. – С. 42-47.
17. *Никулин В.В.* Аналог уравнений вихревой мелкой воды для полых и торнадоподобных вихрей. Высота стационарного торнадоподобного вихря // *ПМТФ.* – 1992. – № 2. – С. 45-52.
18. *Самсонов В.П.* Самопроизвольные вихревые структуры в пламени. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 124 с.
19. *Бубнов Б.М.* Термическая структура и турбулизация торнадоподобных вихрей от локализованных источников тепла над вращающимся диском // *Известия АН. Физика атмосферы и океана.* – 1997. – Т. 33, № 4. – С. 434-442.
20. *Голованов А.Н.* Об акустическом воздействии на параметры течения и теплообмен составной струи в набегающем потоке // *ПМТФ.* – 1989. – № 1. – С. 153-158.
21. *Голованов А.Н.* Влияние акустических возмущений на свободно-конвективное течение // *ПМТФ.* – 2006. – Т. 47, № 5. – С. 27-35.
22. *Сазанович В.М., Цвык Р.Ш.* Экспериментальные исследования конвективной колонки над горящим лесным материалом // *Оптика атмосферы и океана.* – 2002. – Т. 15, № 4. – С. 375-382.

23. *Гришин А.М., Долгов А.А., Рейно В.В., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В.* Тепловизионные исследования низовых лесных пожаров. // Материалы международной конференции «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия. – Иркутск, 2001. – С. 63-66.

24. *Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А.* Введение в теорию свободно-конвективного теплообмена. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1982. – 224 с.

25. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.* Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 390 с.

26. *Абалтусов В.Е., Голованов А.Н., Альперт С.И.* Определение некоторых параметров низкотемпературной плазменной струи. / Газодинамика неравномерных процессов. – Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1981. – С. 3-5.

27. *Гришин А.М.* Аналитическое решение задачи о возникновении огненного смерча // Экологические приборы и системы. – 2006. – № 6. – С. 50-51.

28. *Гришин А.М., Петрин С.В., Петрина Л.С.* Моделирование и прогноз катастроф. Часть 3. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 575 с.

29. *Гебхарт Б., Джалурия И., Махаджан Р., Саммакия Б.* Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1991. – 678 с.

30. *Жигулев В.Н., Тумин А.М.* Возникновение турбулентности. – Новосибирск: Наука, 1987.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Рейно В.В., Сазанович В.М., Строкатов А.А., Суков Я.В., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В.* Экспериментальное исследование огненных смерчей. // Сопряженные задачи механики, информатики и экологии: Материалы международной конференции. – Томск: Изд-во Томского университета, 2004. – С. 67;

2. *Grishin A.M., Golovanov A.N., Rejno V.V., Sazanovich V.M., Strokato A.A., Tsvyk R.Sh.* Experimental researches of fiery tornados // XI Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean opties. Atmospheric Physics” Symposium Proceedings. Tomsk, IOA SB RAS, 2004. – P. 87.

3. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Колесников А.А., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш.* Экспериментальное исследование тепловых и огненных смерчей // Докл. АН. – 2005. – Т. 400, № 5. – С. 618-620.

4. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Рейно В.В., Сазанович В.М., Строкатов А.А., Суков Я.В., Цвык Р. Ш., Шерстобитов М. В.* Лабораторные исследования огненных смерчей // XIII Симпозиум по горению и взрыву. – Черногловка, 2005. – С. 75.

5. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Рейно В.В., Сазанович В.М., Строкатов А.А., Суков Я. В., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В.* Лабораторные исследования

огненных смерчей // XIII Симпозиум по горению и взрыву, Черноголовка (7 – 11 февраля 2005 года). Электр. версия MADB–2–1–11072358–72. Ст. № 20 (10с.).

6. *Golovanov A.N., Strokotov A.A.* Physical Modeling of Fire Tornadoes // 5<sup>th</sup> International Seminar on Flame Structure. – Novosibirsk, 2005. – P. 73.

7. *Голованов А.Н., Строкатов А.А., Суков Я.В.* Экспериментальное исследование огненных смерчей // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XV Школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – Т. 1. – С. 315-318.

8. *Строкатов А.А.* Экспериментальное исследование огненных смерчей // IX Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и образование”, 2005. – Т.6, Ч.3. – С. 192-194.

9. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Строкатов А.А., Руди Ю.А.* Механизм формирования огненного смерча // Материалы 6-ой Международной конференции “Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия”. – Томск: Изд. Томского университета, 2005. – С.37-38.

10. *Строкатов А.А., Руди Ю.А.* Механизм формирования огненного смерча // Снежинск и наука – 2006. Трансфер технологии, инновации, современные проблемы атомной отрасли: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Снежинск Челябинской области: Издательство СГФТА, 2006. – С. 196.

11. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Цвык Р.Ш., Строкатов А.А., Руди Ю.А.* К механизму формирования и эволюции огненного смерча // Международная конференция «Пятые Окуневские чтения». – СПб., 2006. – С. 61-62.

12. *Строкатов А.А.* Физическое моделирование огненных смерчей // Изв. Вузов. Физика. – 2006. – № 3. – С. 254-255.

13. *Гришин А.М., Сазанович В.М., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш.* Исследования распространения лазерного излучения через высокотемпературную закрученную струю // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19, № 12. – С. 1042-1046

14. *Grishin A.M., Golovanov A.N., Rejno V.V., Sazanovich V.M., Strokotov A.A., Tsvyk R.Sh., Sherstobitov M.V.* Experimental Study of Swirling Fire Jets // XIII Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics” Symposium Proceedings. Tomsk, IAO SB RAS, 2006. – P.91.

15. *Grishin A.M., Sazanovich V.M., Strokotov A.A., Tsvyk R.Sh.* Experimental Study of Laser Radiation Propagation through the High-Temperature Swirling Jet // XIII Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics” Symposium Proceedings. Tomsk, IAO SB RAS, 2006. – P.92.

16. *А.М. Гришин, А.Н. Голованов, В.В. Рейно, В.М. Сазанович, А.А. Строкатов, Р.Ш. Цвык, М.В. Шерстобитов.* Экспериментальные исследования огненных смерчей. // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 3. – С. 237-242.