

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГНЕННЫХ И ТЕПЛОВЫХ СМЕРЧЕЙ

А. М. Гришин¹, А. Н. Голованов¹, И. В. Матвеев¹, А. А. Строкатов¹, Р. Ш. Цвык²

¹ Томский государственный университет, Томск, Россия

² Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

Введение. Огненные смерчи есть разновидность атмосферных смерчей (торнадо). Как правило, они возникают при массовых городских [1] или лесных пожарах [2]. Большой интерес представляют результаты численного моделирования динамики пламени огненных вихрей и штормов при пожарах в открытом пространстве [3]. В настоящее время в литературе почти нет экспериментальных данных о возникновении и развитии огненных смерчей в отличие от атмосферных смерчей типа торнадо [4].

Наиболее полный обзор экспериментальных исследований вихревых течений дан в статье Максуорси Т. [4]. Закрутка потока, осуществлялась, как правило, с помощью стенок и торцов и течение развивалось в ограниченной области. Тангенциальная закрутка жидкости или газа через щели в стенке цилиндрической камеры обеспечивает формирование наиболее устойчивых вихревых образований за счет дополнительного градиента давления, направленного от стенки к оси симметрии. Однако такой способ закрутки обладает рядом недостатков, так как не позволяет ответить на вопросы о роли радиального перемещения массы газа к смерчу из окружающей среды и возможности моделирования таких образований в открытом пространстве. Оригинальный способ получения парового смерча описан в статье Б.А. Луговцова [4].

В работах Никулина В.В. [5,6], Сенницкого В.Л. [7] в рамках модели несжимаемой идеальной нереагирующей жидкости исследованы смерчи типа торнадо.

Экспериментальное исследование вихревого течения, когда над вращающейся нагретой поверхностью образуется тепловой смерч, дано в работе Бубнова Б.М. [9]. В ней доказана возможность появления устойчивой вихревой структуры типа торнадо при определенной частоте вращения нагретой поверхности.

Надо сказать, что все способы регистрации параметров течения газа и жидкостей в вихревых смерчах имеют недостатки. Известно, что контактные методы, искажают структуру течения газа, а при использовании бесконтактных способов визуализации гидродинамической картины течения в вихре возникает проблема пространственно-временного разрешения линий тока. Вместе с тем использование комбинированных независимых друг от друга способов измерения параметров течения позволяет судить о достоверности результатов измерений.

Целью данной работы является исследование условий возникновения и существования огненных и тепловых смерчей в открытом пространстве, сравнительный анализ огненных смерчей, полученных при сгорании разных типов горючих, определение существенных критериев подобия и условий возникновения и существования огненных и тепловых

смерчей, исследование влияния акустических колебаний на устойчивость теплового смерча.

1. Объекты горения. Огненные смерчи формировались в результате горения сырой нефти (моделирование катастрофы при авариях на нефтехранилищах), лесных горючих материалов – опада хвои сосны, кедра, лиственницы (моделирование лесных пожаров), фрагментов деревянных конструкций зданий – крупномасштабных с размерами $(1 \times 3 \times 5) \cdot 10^{-2}$ м и мелкомасштабных с размерами $(1 \times 1 \times 3) \cdot 10^{-3}$ м в открытом пространстве для моделирования огненных смерчей, возникающих при крупных пожарах в лесах, городах и населенных пунктах. Для мелкомасштабных фрагментов зданий, также как и для лесных горючих материалов, шероховатость поверхности R_z (среднее расстояние между пятью высшими точками выступов и пятью низшими точками впадин от основания подложки) принимали значения близкие к натурным $R_z = \left(\sum_{i=1}^5 h_i - \sum_{i=6}^{10} h_i \right) / 5$,

$R_z = (0,75 \div 1,75) \cdot 10^{-3}$ м. Площадь поверхности S (площадь подложки), на которой размещались горючие материалы мелкомасштабных фрагментов зданий выбирались из условия $h_0/D = \text{idem}$, где h_0 – высота элементов конструкций зданий, D – диаметр площади, на которой расположен населенный пункт, $h_0/D = (1,0 \div 5,0) \cdot 10^{-3}$. Фрагменты деревянных конструкций зданий моделировались с помощью спичечных коробков и спичек без серных головок.

Лесные горючие материалы (ЛГМ) имели следующие размеры: эффективный диаметр $D_+ = (0,5 \div 1,0) \cdot 10^{-3}$ м, $l/D_+ = (1,0 \div 5,0) \cdot 10^{-3}$, где l – длина ЛГМ. Их влагосодержание определялось по формуле $W = (m - m_0)/m_0$ [2], где m – масса влажных фрагментов, m_0 – масса фрагментов, высушенных при $T=373$ К. Величина $W = (0,07 \div 0,13)$, что ниже критического влагосодержания, при котором возникают лесные пожары [2].

Все горючие материалы размещались на специальные подложки, после чего поджигались. Диаметр подложек варьировался в пределах $(6 \div 35) \cdot 10^{-2}$ м и совпадал с диаметром зоны горения.

2. Экспериментальные установки и методики измерения. На рис. 1 представлены схемы экспериментальных установок, обеспечивающих различные способы закрутки огненных смерчей.

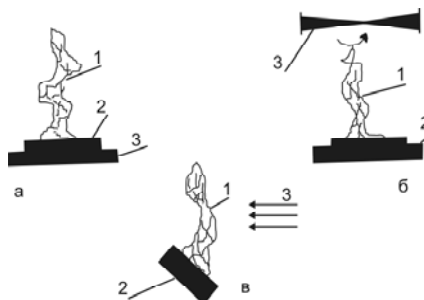


Рис.1. Схема экспериментальных установок для моделирования огненного смерча

Рис. 1,а соответствует тангенциальной закрутке смерча – 1, образованного продуктами сгорания, размещенными на подложке – 2, за счет вращения основания конструкции – 3 с угловой частотой вращения f . На рис. 1,б показано формирование смерча – 1, образованного продуктами сгорания, размещенными на подложке – 2, с помощью вращения лопастей вентилятора – 3, расположенного в верхней части факела. Подложка с горючим материалом при этом оставалась неподвижной. На рис. 1,в смерч – 1 закручивается потоком воздуха – 3, генерируемым дозвуковой аэродинамической трубой типа МТ–324, в направлении перпендикулярном оси симметрии факела. Подложка с горючими материалами расположена под углом к направлению вектора скорости воздушного потока.

В процессе проведения экспериментов после образования огненного смерча контролировались следующие параметры газа и горючих материалов: температура газа T_0 термоэлектрическим методом с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром спая $2 \cdot 10^{-4}$ м; плотность теплового потока q экспоненциальным методом с помощью датчика теплового потока с теплоизолированным чувствительным элементом из материала с высоким значением коэффициента удельной теплопроводности (из меди), толщина чувствительного элемента $2 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр $2 \cdot 10^{-2}$ м; скорость газа линейная v_z в направлении оси Oz (см. рис. 3) и тангенциальная v_t , определялись пневмометрическим методом с помощью насадка Пито-Прандтля диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м, а также фоторегистрацией траекторий движения мелкодисперсных частиц алюминия, вводимых в поток в направлении тангенциальной скорости вращения вихря [10]. Время экспозиции фоторегистрирующего устройства $\tau = 0,008$ с. Обработка фотопленки осуществлялась на микрофотометре МФ–2. Геометрические размеры: радиус r , максимальная высота h определялись с помощью обработки фотографий смерча. Радиальная скорость газа в окружающем смерч пространстве v_r определялась термоанемометрическим методом с помощью платиновой нити диаметром $2 \cdot 10^{-5}$ м, длиной $6 \cdot 10^{-3}$ м.

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), $\delta m \leq 2,3\%$. По результатам измерений (3–5 опытов) рассчитывались доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,95.

Моделирование тепловых смерчей осуществлялось в лабораторных условиях с помощью экспериментальной установки, основанной на закрутке восходящего конвективного потока вращением нижнего основания. На рисунке 2 показано устройство такой экспериментальной установки. Она состоит из электродвигателя – 1, основания – 2, регулятора напряжения – 3, круглого диска – 4 с закрепленным на нем источником тепла, выполненным в форме цилиндрического диска – 5. Внутри диска размещались электрические нагревательные элементы – 6. Частота вращения вала электродвигателя с диском и нагревателем задавалась с помощью регулятора напряжения и варьировалась в пределах $\omega = (0 \div 1,8)$ Гц.

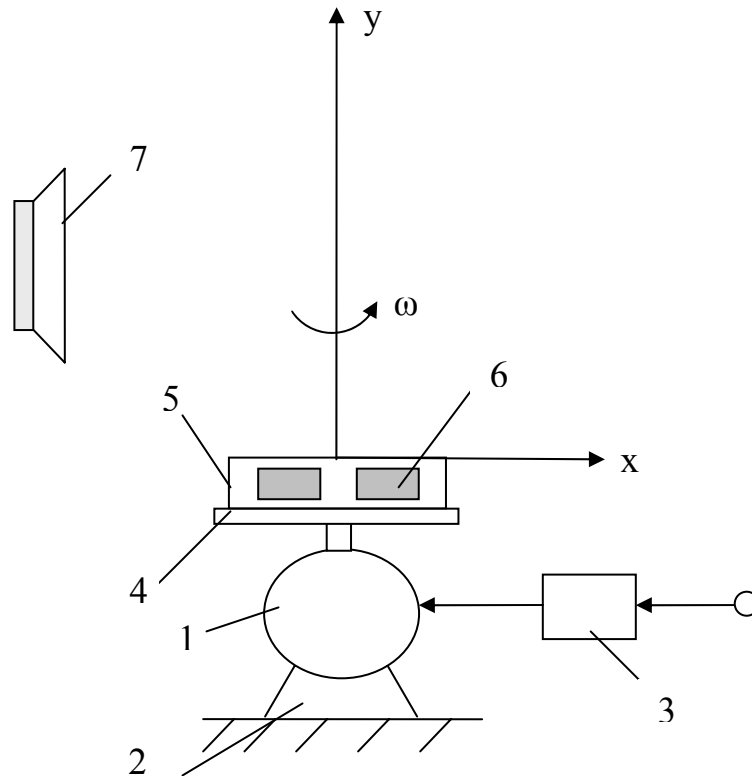


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для моделирования теплового смерча закруткой снизу

Перпендикулярные конвективному потоку акустические колебания возбуждались с помощью динамика – 7 и задавались низкочастотным генератором сигналов ГЗ-56/1.

В процессе проведения экспериментов измерялись: профили скорости w вдоль координаты y с помощью крыльчатого анемометра и температуры T термоэлектрическим методом с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром спая $2 \cdot 10^{-4}$ м; плотность теплового потока q экспоненциальным методом с помощью датчика теплового потока с теплоизолированным чувствительным элементом из материала с высоким значением коэффициента удельной теплопроводности (из меди); контролировалась угловая скорость вращения основания с источником тепла. Суммарные погрешности определения параметров не превышали. $\delta T \leq 5\%$; $\delta w \leq 9\%$; $\delta q \leq 10\%$.

3. Результаты экспериментов. На рис. 2–4 показаны фотографии огненных смерчей [12, 13], полученные при горении нефти без закрутки огненного факела (рис. 3), с закруткой частиц воздуха сверху (рис. 4) и за счет вращения основания конструкции с частотой вращения $f = 1,3$ Гц (рис. 5). Эти фотографии позволяют определить радиус смерча для любой высоты.

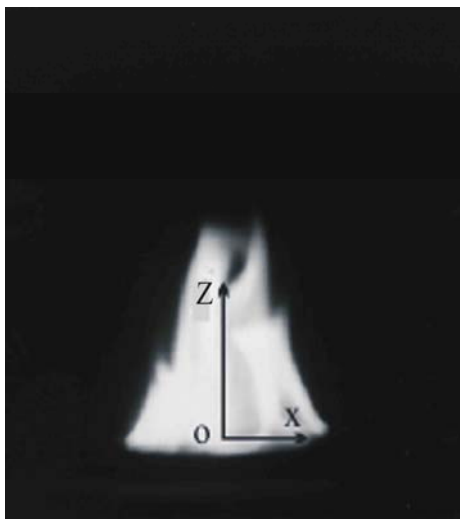


Рис.3. Фотография огненного смерча без закрутки огненного факела

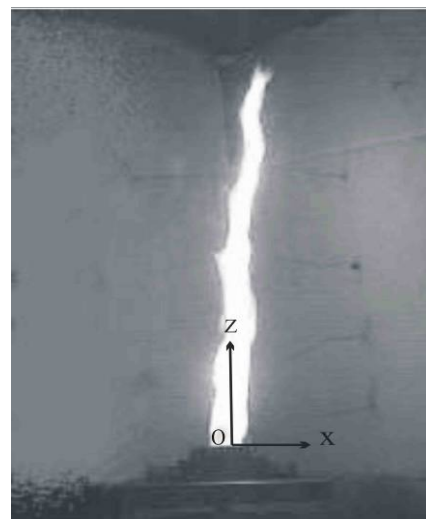


Рис.5. Фотография огненного смерча с закруткой основания конструкции с частотой вращения $f = 1,3$ Гц

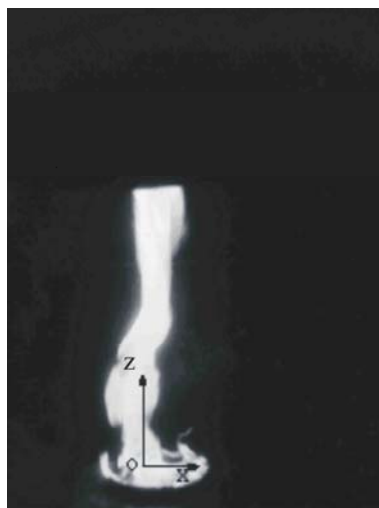


Рис.4 Фотография огненного смерча с закруткой частиц воздуха сверху

В отличие от взаимодействия атмосферного вихря с тяжелой жидкостью в прудах и емкостях, когда ее свободная поверхность имеет вид впадины, при взаимодействии вихря с очагами лабораторных и реальных пожаров светящихся продуктов пиролиза горючих материалов (нефти, ЛГМ и древесины) и смеси газообразных продуктов этих веществ с воздухом образуется конвективная колонка колоннообразной формы [12-13], в которой нагретые частицы алюминия имеют траектории в виде винтовых линий. Температура светящейся зоны конвективной колонки близка к температуре горения смеси газообразных продуктов пиролиза нефти, ЛГМ и древесины с воздухом, который подсасывается к колоннообразному вихрю благодаря тому, что внутри него давление меньше чем снаружи. Режим горения носит диффузионный характер, т.к. вблизи оси симметрии смерча имеется избыток продуктов пиролиза, недостаток кислорода и процесс горения реализуется вблизи поверхности колоннообразного смерча. Поэтому результат этого взаимодействия целесообразно назвать огненным смерчем.

В табл. 1 приведены значения плотности теплового потока, измеренные с помощью датчика, который вводился в различные точки пространства x, z . Чувствительный элемент датчика ориентирован в направлении оси Oz , в направлении линейной скорости v_z . Координаты датчика выбирались из условия нахождения максимальных значений q и их сравнения с величиной плотности теплового потока в пространстве вне огненного смерча.

Таблица 1. Значения плотностей тепловых потоков.

№ п/п	Тип экспериментальной установки	Горючий материал	$q, 10^5$ Вт/м ²	Координаты, м	f, Гц
1	Закрутка основания	Нефть	0,19	$x = 3 \cdot 10^{-2}$, $z = 8 \cdot 10^{-2}$	1,1
2		Нефть	2,4	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,3
3		Крупномасштабные фрагменты	0,34	$x = 3,5 \cdot 10^{-2}$, $z = 16,5 \cdot 10^{-2}$	1,3
4		Мелкомасштабные фрагменты	1,91	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,2
5	Закрутка сверху	Нефть	2,3	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,1
6		Лесные горючие материалы	2,1	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,2
7		Нефть	2,0	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$ ($f = 0$)	1,1
8	Подложка в горизонтальном потоке воздуха	Нефть	2,0	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,2
9		Лесные горючие материалы	2,2	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,1

Анализ результатов измерений плотности теплового потока показывает, что его величина слабо зависит от типа горючих материалов. Мелкомасштабные и крупномасштабные фрагменты изготавливались из сосны, а лесные горючие материалы состояли из опада хвои сосны, кедра, ели и лиственницы. Кроме того, для моделирования лесных пожаров горение нефти использовалось из-за близости теплотворной способности нефти и лесных горючих материалов [2]. Плотность теплового потока в огненном смерче на 13% выше плотности теплового потока со свободно горящей поверхности (см. опыты 5 и 7 в табл. 1), что объясняется увеличением конвективной составляющей теплового потока при формировании смерча.

В табл. 2 приведены значения плотности теплового потока. Плоскость чувствительного элемента датчика была перпендикулярна направлению скорости восходящего потока продуктов горения, совпадающего с осью Oz (см. рис. 3).

Таблица 2. Значения плотности теплового потока q в огненном смерче от горящей нефти

№ п/п	$m, 10^{-3}$ кг	τ_0, c	$q, 10^5$ Вт/м ²	A	f, Гц
1	18,3	278	1,9	0,67	1,1
2	31,7	473	2,4	0,70	1,2
3	32,0	406	2,3	0,65	1,2

Плотность теплового потока рассчитывалась по формуле $q = AmQ_+/\tau_0S$, где $Q_+ = 46 \cdot 10^6$ Дж/кг – тепловой эффект реакции горения нефти, m – масса горючего, S – площадь поперечного сечения пламени в емкости для горючего, τ_0 – время горения, A – согласующий множитель. Легко видеть, что плотность тепловых потоков, генерируемых смерчами в лабораторных условиях, согласуется с расчетными данными (см. табл. 1 и 2).

В табл. 3 приведены значения скоростей течения газа вблизи огненного смерча, измеренные различными способами. Координаты точек, в которых проводилось измерение скоростей, выбирались с целью выяснения механизма формирования смерча, роли закрутки газа и наличия течения газа из окружающего пространства к смерчу. Изменение знака радиальной составляющей скорости газа вблизи границы смерча (см. табл. 3 опыты 10÷15) свидетельствует о поступлении воздуха из окружающей среды к смерчу. Следовательно, процесс горения в огненном смерче поддерживается за счет поступления окислителя из окружающей среды, что соответствует диффузионному режиму горения.

Таблица 3. Значения скоростей газа

Тип установки	№ п/п	Горючий материал	$v_r, m/c$	$v_z, m/c$	$v_r, m/c$	$x, 10^{-2}$ м	$z, 10^{-2}$ м	Метод измерения
Закрутка основания подложки	1	Нефть	1,7	—	—	2,0	5,0	Трубка Пито
	2		0,7 0,85	1,5 2,9	—	1,0 1,1	5,3 10,1	Треки
	3	Круп. фраг.	1,4	—	—	2,0	5,0	Трубка Пито
Закрутка сверху	4	Нефть	1,3	—	—	2,0	5,0	Треки
	5		0,75	1,4	—	1,0	5,0	
	6		0,25	—	—	1,0	2,0	
	7		0,1	—	—	3,5	1,0	
	8		0,7	2,2	—	2,5	8,0	
	9		0,75 0,8	3,1 3,0	—	1,5 1,0	10,2 10,0	
	10		—	—	-0,2	4,0	2,0	Термоанемометр
	11		—	—	-0,15	5,0	2,0	
	12		—	—	-0,1	6,0	2,0	
	13		—	—	-0,3	4,0	10,0	
	14		—	—	-0,25	5,0	10,0	
	15		—	—	-0,2	6,0	2,0	

Подложка в горизонтальном потоке	16	ЛГМ	1,8	—	—	2,0	5,0	Трубка Пито
	17		1,4	—	—	2,0	7,0	

Примечание: высота смерчей для всех опытов изменялась с течением времени в пределах (0,4÷1,0) м.

В результате фотографирования треков светящихся частиц алюминия имеющих форму винтовой линии было установлено, что на высоте $z = 0,01$ м зарождается вихрь, а на высоте $z = 0,08 \div 0,1$ м он становится устойчивым до значения $z = 0,6 \div 0,8$ м. Вихревое движение газа существовало до высот $z = (0,8 \div 1,0)$ м, после чего диффузионное горение прекращалось. Высота смерча определялась по светящейся области на фотографиях. Тангенциальная скорость вихря v_τ , которая измерялась по трекам частиц на границе светящейся области, с ростом высоты уменьшалась, при этом радиус смерча увеличивался (см. рис. 4), а линейная скорость газа v_z в направлении оси Oz возрастала до высоты, характеризующей высоту смерча h .

Этот факт можно объяснить притоком массы воздуха из окружающего смерч пространства и отсутствием паров горючего при $z > h$. Измерения радиальной скорости газа с помощью термоанемометра подтвердили факт притока массы воздуха к центру. Независимо от способа закрутки газового потока (снизу, сверху, сбоку) огненный смерч всегда возникал при угловой частоте вращения газа $f = (1,1 \div 1,3)$ Гц (см. табл. 1). Дальнейшее увеличение частоты вращения приводило к разрушению огненного смерча.

Исследовалось влияние закрутки потока на скорость горения лесных горючих материалов одинаковой массы, часть которых сжигалась без закрутки потока, а другая с закруткой. Результаты измерения приведены в табл. 4.

Таблица 4. Время горения τ_0 на свободной поверхности и в закрученном потоке

№	Условия проведения опытов	τ_0 , с	Примечания
1	Без закрутки	45,0	—
2		43,0	—
3		44,0	—
4		37,0	—
5	С закруткой потока $f = 1,3$ Гц	39,0	Неполное сгорание по краям подложки, затяжное очаговое горение

В процессе проведения экспериментов рассматривался вопрос о поведении и формировании теплового смерча, изменении его геометрических размеров, а так же о воздействии акустических колебаний на термогазодинамические характеристики теплового смерча. При моделировании была выяснена минимальная частота закрутки основания ω . Смерч появлялся при $\omega=0,7$ Гц, однако был неустойчив. Во всём диапазоне изменения ω диаметр смерча менялся незначительно и составлял $(1,5\div 2,5)\cdot 10^{-2}$ м у основания, тогда как высота смерча при увеличении угловой скорости вращения основания возрастала от 30 см до 70 см. При увеличении ω до $\omega=1,8$ Гц смерч также становился неустойчивым. В связи с этим дальнейшие измерения профилей температуры осуществлялось при частоте $\omega=1,3$ Гц.

Таблица 5. Геометрические размеры теплового смерча

Частота вращения ω , Гц	Высота h , м	Диаметр d , м
0,7	$35 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
1,3	$50 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
1,8	$65 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$

В таблице 6 приведены расчеты эффективного радиуса в модели вихря Бюргерса[14] для полученного в лабораторных условиях теплового смерча. Из анализа этих данных видно, что тепловой смерч исследуемый в процессе экспериментов хорошо соотносится с моделью вихря Бюргерса.

Таблица 6. Расчет эффективного радиуса в модели вихря Бюргерса

h , м	T , °К	w , м/с	ν , 10^{-5} м ² /с	α , 1/с	r , 10^{-3} м
0,2	324,4158	0,505	1,77	2,525	7,86
0,3	322,2892	0,605	1,77	2,016667	7,18
0,4	319,8082	0,65	1,77	1,625	6,93
0,5	313,4285	0,585	1,77	1,17	7,30

Ниже приведены фотографии тепловых смерчей при трёх режимах вращения основания.



Рисунок 6. Фотография теплового смерча при частоте вращения основания $\omega=0,7$ Гц



Рисунок 7. Фотография теплового смерча при частоте вращения основания $\omega=1,3$ Гц

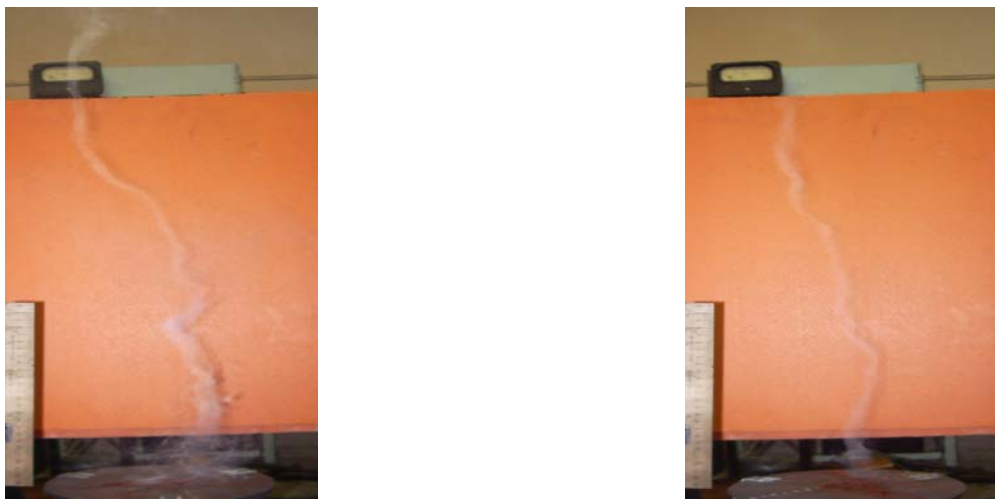


Рисунок 8. Фотографии теплового смерча при частоте вращения основания $\omega=1,8$ Гц

Анализ полученных результатов взаимодействия акустических колебаний и теплового смерча показывает, что акустические возмущения приводят к искажениям термогазодинамической структуры течения газа в тепловом смерче. Существуют частоты акустического поля, при которых наблюдается явление разрушения теплового смерча. На рисунках 9, 10 показаны зависимости температуры газа в конвективной колонке и тепловом смерче при частотах акустических колебаний 1000 Гц и 2000 Гц соответственно. По оси абсцисс отмечена высота в метрах над нагревателем, по оси ординат – температура в градусах Кельвина на оси симметрии.

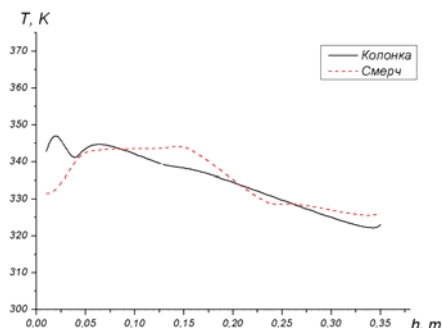


Рисунок 9. Профили температуры в конвективной колонке и смерче с воздействием акустических колебаний частотой 1000 Гц

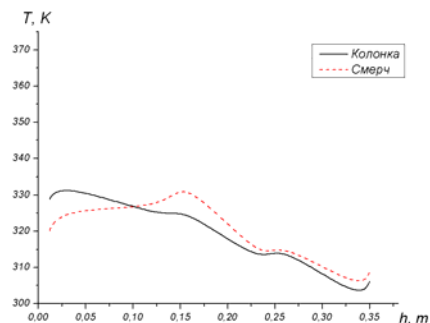


Рисунок 10. Профили температуры в конвективной колонке и смерче с воздействием акустических колебаний частотой 2000 Гц

4. Обсуждение результатов. Визуализация гидродинамической картины течения газа в огненном и тепловом смерче, результаты измерения термогазодинамических параметров, скорости горения и их анализ позволяют сформулировать механизм формирования и эволюции огненных и тепловых смерчей.

Формированию смерча предшествует появление конусообразной конвективной колонки, образованной газообразными продуктами пиролиза реагирующих веществ и продуктами сгорания для огненного смерча и источником тепла для теплового. Ее интенсивность не зависит от типа горючих материалов, а зависит от величины плотности теплового потока

q. Закрутка газового потока приводит к появлению центробежных сил, стремящихся увеличить ширину смерча, однако этого не происходит из-за уравнивания действия центробежных сил градиентом давления, направленным в приосевую зону. Влияние градиента давления будет определяться температурой смеси газов в центре конусообразной колонки, уменьшением плотности этой смеси и значением плотности теплового потока от источника зажигания или нагрева. Снижение плотности газа в приосевой зоне интенсифицирует восходящий конвективный поток, линейная вертикальная скорости газа при этом возрастает. Этот процесс сопровождается увеличением высоты факела в несколько раз. Скорость горения в огненном смерче несколько выше, чем при свободном горении. На площади, где находится основание огненного смерча, в периферийных областях из-за недостатка окислителя происходит недогорание остатков источника зажигания. Огненный смерч менее устойчив, чем тепловой, значения параметров закрутки, угла наклона подложки лежат в достаточно узкой области их изменения. Угловая частота вращения смерча во всех опытах оставалась консервативной величиной $f = f_* = (1,1 \div 1,3)$ Гц для огненного и $\omega = \omega_* = (0,7 \div 1,8)$ Гц для теплового смерча. В реальных условиях плотность газа на оси симметрии вихря уменьшается вследствие конвекции теплого воздуха из приземного слоя для теплового смерча или подъеме горячих продуктов сгорания в огненном смерче. Кроме того, на образование смерча будут влиять силы трения и тяжести, т.е. формирование, и функционирование смерча будет определяться действием четырех сил: плавучести, тяжести, трения и силы, обеспечивающей закрутку вихря. Критерий, характеризующий вращательное движение частиц в смерче F [4].

$$F = \frac{vhv_z}{\Gamma^2}, \quad (1)$$

где h – характерный масштаб (высота смерча); v – кинематическая вязкость, которая бралась из работы [10]; v_z – скорость газа в вертикальном направлении; $\Gamma = 2\pi r v_\tau$ – циркуляция скорости; r – радиус колоннообразного огненного смерча, v_τ – тангенциальная составляющая скорости.

Для оценки мощности тепловыделения от продуктов сгорания вводится критерий Остроградского, используемый для описания конвективных течений [15].

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

где Q – объемное тепловыделение, S – площадь поверхности горения, d – диаметр смерча, q – плотность теплового потока.

Близость значений критериев подобия ($F = idem, Os = idem$) для разных способов формирования огненного смерча доказывает то, что этот процесс не зависит от способа закрутки газового потока и, что выбранные безразмерные величины являются критериями подобия решаемой задачи. Используя условие локального механического равновесия смерча и вращающейся платформы [13,15], а также экспериментальные результаты, полученные в [9], в данной работе удалось получить полуэмпирическую формулу для критической (равновесной) частоты вращения платформы, при которой имеет место огненный смерч

$$f_* = a_* \left(\frac{2gh(T_0 - T_e)}{T_e} \right)^{0.5} r_*^{-1} \quad \text{или} \quad Ro = a_* \quad (3)$$

Здесь f_* – частота вращения платформы, h – высота колоннообразного огненного смерча; r_* – радиус светящегося факела у основания смерча, который определяется на основе анализа фотографий факела смерча, T_0 – температура на оси огненного смерча; T_e – температура окружающей среды; $a_* = 8 \cdot 10^{-3}$ – эмпирическая константа соответствующая огненному смерчу, которая найдена с использованием данных табл. 5. Из анализа (3) следует, 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, $Ro = r_* \cdot f_* \sqrt{\frac{T_e}{2gh(T_0 - T_e)}}$ – критерий Россби [9].

Формула (3) с точностью до константы a_* совпадает с формулой, полученной в работах [11,13,15].

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Кэрьер, Фендел, Фелдман. Огненные смерчи. // Теплопередача. 1985. Т. 107. № 1. С. 16-25.
- [2]. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
- [3]. Гостинцев Ю.А., Рыжов А.М. Численное моделирование динамики пламени, огненных вихрей и штормов при пожарах на открытом пространстве // Механика жидкости и газа. 1994. №6. С. 52-61.
- [4]. Интенсивные атмосферные вихри / Под ред. Бенгтссона Л., Лайтхилла Дж. М.: Мир, 1985.
- [5]. Никулин В.В. Распад вертикального торнадоподобного вихря // ПМТФ. 1992. № 4. С. 42-47.
- [6]. Никулин В.В. Движение завихренной жидкости в ядре вертикального торнадоподобного вихря // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 2. С. 81-87.
- [7]. Сенницкий В.Л. Модель смерча // Вестник НГУ. 2001. Вып. 1. С. 103-106.
- [8]. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2003.
- [9]. Самсонов В.П. Самопроизвольные вихревые структуры в пламени. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003.
- [10]. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В. Физическое моделирование огненных смерчей. // Докл. АН. Т. 395. № 2. М.: Наука, 2004. С. 196-198.
- [11]. Гришин А.М., Голованов А.Н., Колесников А.А., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш. Экспериментальное исследование тепловых и огненных смерчей // Докл. АН. Т. 400. № 5. М.: Наука, 2005. С. 618-620.
- [12]. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Введение в теорию свободноконвективного теплообмена. Л.: Изд-во Ленинградского университета. 1982.
- [13]. Гришин А.М., Петрин С.В., Петрина Л.С. Моделирование и прогноз катастроф. Часть 3. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 576 с.
- [14]. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2003.
- [15]. Гришин А.М. Аналитическое решение задачи о возникновении огненного смерча // Экологические системы и приборы. 2006. № 6. С. 50-51.