

Физическое моделирование огненных смерчей

А.М. Гришин¹, А.Н. Голованов¹, Я.В. Суков¹, Р.Ш. Цвык^{2*}

¹Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 14.04.2008 г.

В лабораторных условиях тремя независимыми способами получены огненные смерчи. Найдены критерии подобия решаемой задачи. Показано, что формирование огненного смерча не зависит от источника горения, а определяется величиной плотности теплового потока.

Ключевые слова: огненный смерч, критерии подобия, тепловой поток, скорость горения.

Введение

Огненные смерчи есть разновидность атмосферных смерчей (торнадо). Как правило, они возникают при массовых городских [1] или лесных пожарах [2, 19]. 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].

Мощные природные смерчи (торнадо) возникают из вращающегося материнского облака и опускаются в виде хобота до земли. Скорость вращения на периферии может достигать скорости звука, а за счет центробежной силы в смерче возникает пониженное давление. Огненный смерч представляет собой более сложное физическое явление. Он отличается от обычных атмосферных смерчей наличием мощного притока окислителя (воздуха) в зону горения, необходимого для сжигания горючего материала, высокой температурой в зоне горения за счет химических реакций окисления с выделением большого количества энергии в достаточно большом объеме и мощной нагретой конвективной колонкой, возникающей над горящим материалом. Эти отличия могут привести к изменению условий возникновения вихревого течения и критериев подобия, описывающих такие течения.

Наиболее полный обзор экспериментальных исследований вихревых течений дан в статье Т. Максуорси [4]. Как правило, закрутка потока осуществлялась с помощью стенок и торцов, установленных вокруг возбуждаемой области, 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 [5–7] в рамках модели несжимаемой идеальной не реагирующей жидкости исследованы смерчи типа торнадо. Содержательное введение в теорию концентрированных вихрей дано в [8].

Экспериментальные исследования теплового смерча, который формируется над вращающейся нагретой поверхностью, выполнены в [9]. В этой работе доказана возможность появления устойчивой вихревой структуры типа торнадо при определенной частоте вращения нагретой поверхности.

Большой интерес представляют результаты, полученные в монографии [10], где представлены методики и результаты экспериментального исследования самопроизвольных вихревых структур в пламенах, образующихся при горении углеводородных топлив в трубах и замкнутых объемах.

В рамках модели сжимаемого многокомпонентного идеального газа с использованием гипотезы о локальном равновесии вращающейся платформы и огненного смерча получены аналитические формулы для высоты огненного смерча [11–13].

В работах [14–18] изложены результаты экспериментальных исследований огненных смерчей, формируемых путем закрутки внешним воздушным потоком и распространения лазерного излучения через смерч. Этот способ формирования моделиру-

* Анатолий Михайлович Гришин (fire@mail.tsu.ru); Александр Николаевич Голованов; Ярослав Владиславович Суков; Рувим Шахнович Цвык (tsvyk@iao.ru).

ет закрутку пламени атмосферными смерчами, которые возникают вблизи поверхности земли, т.е. вокруг очага горения возникает аналог границы (трубы), который способствует стабилизации смерча. В [14–18] показано, что устойчивый смерч начинает формироваться при скорости вращения $n > 2$ об/с и сохраняется практически до полного сгорания топлива при скорости вращения до 18 об/с, которые получены в эксперименте. Высота, диаметр, эффективный тепловой поток смерча, скорость горения топлива, частота максимума спектральной функции флуктуаций центра тяжести изображения лазерного пучка, распространяющегося через смерч, линейно растут с увеличением скорости вращения при $n > 2$ об/с, а частота максимума спектральной функции флуктуаций интенсивности растет линейно при $n > 5$ об/с. Эти характеристики (с учетом переходного участка установления смерча) при всех n хорошо описываются уравнением вида $a + bn + c \exp(-n/k)$, где a, b, c, k – константы, зависящие от измеряемого параметра. Линейная зависимость между частотой максимума флуктуаций параметров лазерного пучка и скоростью вращения открывает перспективу для развития оптических (дистанционных) методов измерения турбулентного режима и составляющих скорости движения потока непосредственно в смерче.

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. Оптические методы, основанные на анализе статистических параметров лазерных пучков, прошедших через случайную среду, широко применяются в атмосферных исследованиях, а также для измерения параметров самой среды. Совместное использование различных методов измерения параметров течения контактными датчиками и оптическими методами позволяет повысить достоверность результатов измерений и разработать новые дистанционные средства измерений параметров такой сложной по структуре среды в огненном смерче.

Наша цель заключается в исследовании условий возникновения и существования огненных смерчей в открытом пространстве, сравнительном анализе огненных смерчей, полученных при сгорании разных типов горючих материалов, определении существенных критериев подобия и условий возникновения и существования огненных смерчей. В данной статье моделируется смерч, который формируется за счет вихревых структур, возникающих при вращении очага горения [10]. Исследование условий возникновения и определение безразмерных критериев подобия, которые описывают гидродинамические и тепловые явления в похожих структурах различного размера, дают возможность использовать результаты модельных экспериментов

при изучении реальных огненных смерчей. Разрабатываемые пассивные (по статистическим параметрам собственного излучения пламени) и активные (с использованием источников излучения) оптические методы измерения параметров среды можно будет применять при исследованиях на крупномасштабных моделях.

1. Объекты горения

Модельные огненные смерчи формировались при сжигании: сырой нефти (моделирование катастрофы при авариях на нефтехранилищах), лесных горючих материалов (опада хвой сосны, кедр, лиственцы – моделирование лесных пожаров), фрагментов деревянных зданий (крупномасштабных и мелкокомасштабных – моделирование огненных смерчей, возникающих при крупных пожарах в лесах, городах и населенных пунктах).

Неровность поверхности горения характеризовалась следующими параметрами (ГОСТ 2.789-73): среднеарифметическим отклонением профиля R_a , максимальным среднеарифметическим отклонением профиля R_z , R_{zn} , относительной опорной длиной t_a :

$$R_a = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |h_i - \langle h \rangle| \right),$$

$$R_z = \frac{1}{10} \left(\sum_{i=1}^{10} |h_{i\max} - \langle h \rangle| + \sum_{i=1}^{10} |h_{i\min} - \langle h \rangle| \right), \quad t_a = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i,$$

где h_i – высота неровностей; $\langle h \rangle$, $h_{i\max}$, $h_{i\min}$ – средняя, 10 максимальных и 10 минимальных высот неровностей; l – общая длина пути анализа; b_i – длина пути в неровностях на уровне $\langle h \rangle$.

Для сравнения параметров шероховатости в реальных и модельных условиях рассчитаем нормированное отклонение профиля $R = R_a / \langle h \rangle$ и относительную опорную длину t_a .

Для мелкокомасштабных фрагментов деревянных зданий: реальные условия – размеры $6 \times 5 \times 18$ м, расстояние между ними – 6 м, параметр $\langle h \rangle = 3$ м, $R_a = 3$ м, $R = 1$, $t_a = 1$, модель (разрезанные спички без головок) – $(1 \times 1 \times 3) \cdot 10^{-3}$ м, расстояние между ними – 10^{-3} м, параметр $\langle h \rangle = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $R_a = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $R = 1$, $t_a = 1$. Аналогично близки параметры шероховатости для крупномасштабных конструкций – спичечные коробки – $(10 \times 30 \times 50) \cdot 10^{-3}$ м.

Лесные горючие материалы (ЛГМ) имели следующие размеры: эффективный диаметр $D_+ = (0,5 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ м и длину $l = (1 \div 5,0) \cdot 10^{-3}$ м, толщина слоя $\sim 0,02$ м. Их влажосодержание W определялось по формуле $W = (m - m_0) / m_0 = 0,07 \div 0,13$ [2], что ниже критического, при котором возникают лесные пожары [2]. Здесь m – масса влажных фрагментов, m_0 – масса фрагментов, высушенных при 373 К.

Все горючие материалы размещались на специальных подложках, после чего поджигались. Диаметр подложек варьировался в пределах 0,06–0,35 м и совпадал с диаметром зоны горения.

2. Экспериментальные установки и методики измерения

На рис. 1 показаны схемы установок, обеспечивающих различные способы закрутки огненных смерчей.

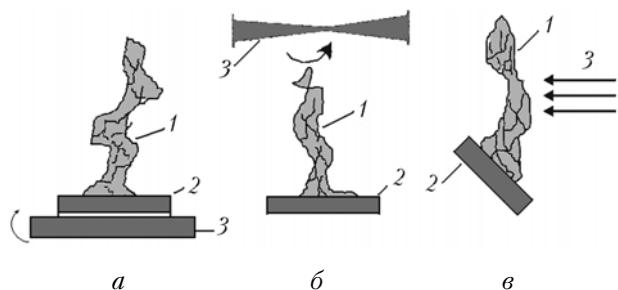


Рис. 1. Способы моделирования огненного смерча

На рис. 1, *а* представлена схема с тангенциальной закруткой смерча 1, образованного продуктами сгорания, размещенными на подложке 2, путем вращения основания конструкции 3 с частотой f . Формирование смерча 1, образованного продуктами сгорания, размещенными на подложке 2, с помощью вращения лопастей вентилятора 3, расположенного в верхней части факела, показано на рис. 1, *б*. Подложка с горючим материалом при этом оставалась неподвижной. Смерч 1 закручивается потоком воздуха 3, который генерируется дозвуковой аэродинамической трубой типа МТ-324, в направлении, перпендикулярном оси симметрии факела (рис. 1, *в*). Подложка с горючими материалами расположена под углом к направлению вектора скорости воздушного потока.

В процессе проведения экспериментов после образования огненного смерча определялись следующие параметры смерча:

- температура газа на оси смерча 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, закрепленного на теплоизолированной рукоятке и выполненного из материала с высоким значением коэффициента удельной теплопроводности (медь диаметром $2 \cdot 10^{-2}$ м), в котором установлена термопара диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м;

- вертикальная V_z и тангенциальная V_τ компоненты скорости течения – пневмометрическим методом с помощью трубки Пито диаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м (метод измерения разности давлений навстречу потоку и перпендикулярно ему), а также фоторегистацией траекторий движения мелкодисперсных частиц алюминия, которые вводились в поток в направлении тангенциальной скорости вращения вихря [10]. Время экспозиции фоторегистрирующего устройства $\tau = 0,008$ с;

- радиальная скорость газа в окружающем смерч пространстве V_r – термоанемометрическим

методом с помощью платиновой нити диаметром $2 \cdot 10^{-5}$ м, длиной $6 \cdot 10^{-3}$ м;

- геометрические размеры: радиус r , максимальная высота h_c – по фотографиям смерча. Обработка фотоленки осуществлялась на микрофотометре МФ-2.

Суммарные погрешности определения параметров не превышали $\delta T \leq 5\%$, $\delta q \leq 9\%$, $\delta V \leq 9\%$ (термоанемометр), $\delta V \leq 8\%$ (треки светящихся частиц), $\delta V \leq 6\%$ (насадок Пито), $\delta m \leq 2,5\%$ (ошибка взвешивания). По результатам измерений (3–5 опытов) рассчитывались доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,95.

3. Результаты экспериментов

На рис. 2 показано горение нефти в различных режимах. Фотографии позволяют определить радиус смерча и его высоту. При горении смеси газообразных продуктов пиролиза горючих материалов (нефти, ЛГМ и древесины) с воздухом образуется конвективная колонка, в которой траектории движения имеют вид винтовых линий. Поэтому такое вихревое течение можно считать моделью огненного смерча.

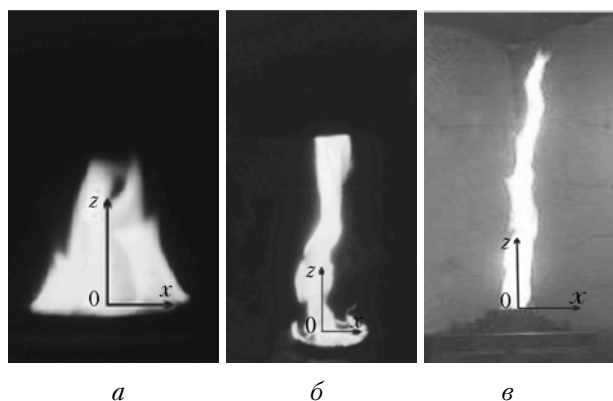


Рис. 2. Горение нефти в режиме диффузионного горения: *а* – без закрутки; *б* – с закруткой воздуха сверху; *в* – за счет вращения основания емкости с горючим при частоте вращения основания $f = 1,3$ Гц

В табл. 1 приведены значения плотности теплового потока q , измеренные с помощью датчика, который вводился в различные области горения x , z (см. рис. 2). Чувствительный элемент датчика ориентирован в направлении оси z (направление скорости V_z). Датчик устанавливался на оси смерча ($x = 0$), где величина q максимальна, и для сравнения на периферии огненного смерча при $x = (3 \div 3,5) \cdot 10^{-2}$ м.

Анализ результатов измерений плотности теплового потока показывает, что его величина слабо зависит от типа горючих материалов. Их мелко-масштабные и крупномасштабные фрагменты изготавливались из сосны, а лесные горючие материалы состояли из опада хвои сосны, кедра, ели и листвы.

Таблица 1

Значения плотности тепловых потоков при сжигании горючих материалов в различных режимах моделирования

Тип установки	Горючий материал	q , 10^5 Вт/м ²	Координаты, м	f , Гц
Закрутка основания	Нефть	0,19	$x = 3,0 \cdot 10^{-2}$, $z = 8,0 \cdot 10^{-2}$	1,1
	Нефть	2,4	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,3
	Фрагменты: крупномасштабные мелкомасштабные	0,34	$x = 3,5 \cdot 10^{-2}$, $z = 16,5 \cdot 10^{-2}$	1,3
		1,91	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,2
Закрутка сверху	Нефть	2,3	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,1
	Лесные горючие материалы	2,1	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,2
Подложка в горизонтальном потоке	Нефть	2,0	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,2
	Лесные горючие материалы	2,2	$x = 0$, $z = 0,2 \cdot 10^{-2}$	1,1

Плотность теплового потока в огненном смерче на 13% выше плотности теплового потока со свободно горящей поверхности, что объясняется увеличением конвективной составляющей теплового потока при формировании смерча.

В табл. 2 приведены значения плотности теплового потока q и скорости горения нефти m_r , рассчитанные по массе m и времени горения τ_0 .

Таблица 2

Расчетные значения плотности теплового потока q в огненном смерче при сжигании нефти

m , 10^{-3} кг	τ_0 , с	m_r , г/с	q , 10^5 Вт/м ²	A	f , Гц
18,3	278	0,066	1,9	0,67	1,1
31,7	473	0,067	2,4	0,70	1,2
32,0	406	0,079	2,3	0,65	1,2

Плотность теплового потока рассчитывалась по формуле

$$q = AmQ_+/\tau_0S,$$

где $Q_+ = 46 \cdot 10^6$ Дж/кг – теплопроизводительность горения нефти; S – площадь горящей поверхности; A – согласующий множитель, который введен для учета неконтролируемых потерь тепла на излучение и перенос конвективными потоками, возникающими на границе горения. Видно, что плотность тепловых потоков, генерируемых смерчами в лабораторных условиях, согласуется с расчетными данными (см. табл. 1 и 2).

В табл. 3 приведены значения компонент скорости течения газа, 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. В экспериментах наблюдался радиальный приток воздуха в нижней части смерча. Это указывает на то, что процесс горения в огненном смерче поддерживается за счет поступления окислителя из окружающей среды, что соответствует диффузионному режиму горения.

Таблица 3

Значения компонент скорости движения горящих продуктов в огненном смерче, измеренные различными методами

Тип установки	Горючий материал	Скорость, м/с			Координаты, 10^{-2} м		Метод измерения
		V_x	V_z	V_r	x	z	
Закрутка основания	Нефть	1,7	–	–	2,0	5,0	Трубка Пито
		0,70	1,5	–	1,0	5,3	Треки
		0,85	2,9	–	1,1	10,1	
Закрутка сверху	Крупные фрагменты	1,40	–	–	2,0	5,0	Трубка Пито
		1,30	–	–	2,0	5,0	Треки
		0,75	1,4	–	1,0	5,0	
	0,25	–	–	1,0	2,0		
	0,10	–	–	3,5	1,0		
	0,70	2,2	–	2,5	8,0		
	0,75	3,1	–	1,5	10,2		
	0,80	3,0	–	1,0	10,0		
	–	–	–0,20	4,0	2,0	Термоанемометр	
	–	–	–0,15	5,0	2,0		
	–	–	–0,10	6,0	2,0		
	–	–	–0,30	4,0	10,0		
	–	–	–0,25	5,0	10,0		
–	–	–0,20	6,0	2,0			
Подложка в горизонтальном потоке	Лесные горючие материалы	1,8	–	–	2,0	5,0	Трубка Пито
		1,4	–	–	2,0	7,0	

Примечание. Высота смерчей для всех опытов изменялась с течением времени в пределах 0,4±1,0 м.

На рис. 3 приведена зависимость тангенциальной составляющей V_τ от координат. Пунктиром обозначен средний радиус смерча (см. ниже данные табл. 6). Из рис. 3 следует, что при $z > 0,04$ м составляющая скорости V_τ практически постоянна по высоте внутри смерча, растет к периферии и быстро спадает за его пределами.

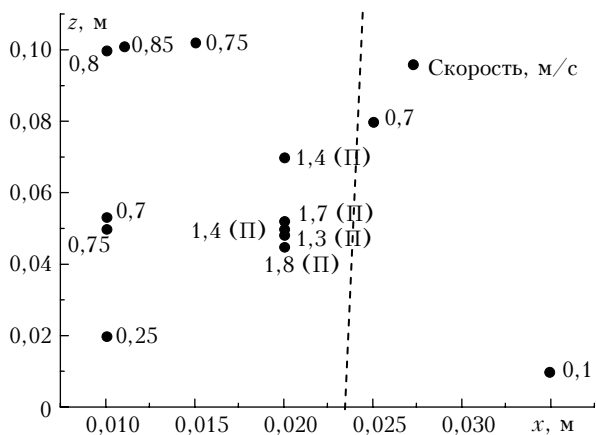


Рис. 3. Зависимость тангенциальной составляющей V_τ от координат, измеренной по трекам горящих частиц, вводимых в пламя, и трубкой Пито (индекс П) — средний радиус смерча

По фотографиям треков светящихся частиц алюминия, имеющих форму винтовой линии в области вихревого течения, было установлено, что вихрь зарождается на высоте $z \sim 0,01 \div 0,02$ м (V_τ мала, рис. 3). На высоте $z = 0,08 \div 0,1$ м он становится устойчивым до значения $z = 0,6 \div 0,8$ м, а затем диффузионное горение прекращается.

Этот факт можно объяснить притоком массы воздуха из окружающего смерч пространства, необходимого для горения (нефти — 15, дерева 5–8 м³/кг) при $z < 0,02 \div 0,08$. При $z > h_c$ прекращается процесс горения, так как концентрация паров горючих газов недостаточна. Независимо от способа закрутки газового потока (снизу, сверху, сбоку) огненный смерч всегда формировался при частоте вращения газа $f = 1,1 \div 1,3$ Гц (см. табл. 1). Дальнейшее увеличение частоты вращения основания приводило к разрушению огненного смерча.

Исследовалось влияние закрутки потока на время горения лесных горючих материалов одинаковой массы, которые сжигались без закрутки потока и с закруткой. Результаты измерения приведены в табл. 4.

Таблица 4

Время горения τ_0 на свободной поверхности и в закрученном потоке

Условия проведения опытов	Время горения τ_0 , с	Примечания
Без закрутки	45,0	—
	43,0	—
	44,0	—
С закруткой потока $f = 1,3$ Гц	39,0	Неполное сгорание по краям подложки, затяжное очаговое горение

Было установлено, что в закрученном потоке время горения на 10% меньше, чем при отсутствии закрутки потока, что объясняется увеличением скорости диффузионного горения за счет поступления кислорода из окружающей среды. Это, как и наличие радиальной составляющей скорости потока, указывает на то, что процесс горения в огненном смерче поддерживается за счет поступления окислителя из окружающей среды. Это соответствует диффузионному режиму горения.

Увеличение скорости горения в зависимости от скорости вращения наблюдалось и при другом методе моделирования смерча (закрутка воздушным потоком при неподвижной емкости) [18].

4. Обсуждение результатов

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

Формированию смерча предшествует появление конусообразной конвективной колонки, образованной газообразными продуктами пиролиза реагирующих веществ и продуктами сгорания. Эта колонка образуется в результате действия сил Архимеда при горении горючего материала. Ее интенсивность зависит не от типа горючих материалов (сырой нефти, мелких и крупномасштабных фрагментов, лесных горючих материалов), а от плотности теплового потока q (близкие значения для различных способов закрутки и типов горючих материалов). Закрутка газового потока приводит к появлению центробежных сил, стремящихся увеличить ширину факела, однако этого не происходит из-за уравнивания действия центробежных сил градиентом давления, направленным в приосевую зону колонки.

Влияние градиента давления будет определяться температурой смеси газов в центре колонки, уменьшением плотности этой смеси и значением плотности теплового потока от источника зажигания. 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 (см. рис. 2, в). В зону горения поступает окислитель из окружающей среды, скорость горения источника при этом несколько возрастает. На площади, где находится основание огненного смерча, в периферийных областях из-за недостатка окислителя происходит неполное сгорание горючего материала. Следовательно, процесс горения в огненном смерче носит диффузионный характер.

Формирование и эволюция огненного смерча не зависят от способа его закрутки, а определяются возникновением момента силы, обеспечивающего закрутку газа.

Моделируемый огненный смерч менее устойчив, чем вихрь торнадо. Значения параметров закрутки, угла наклона подложки лежат в достаточно узкой области их изменения, что, по всей видимости, обусловлено необходимостью смешения продуктов пиролиза с кислородом воздуха, а также высоким значением градиентов температур в огненном смерче по сравнению с вихрями торнадо. Частота вращения смерча во всех опытах оставалась консервативной величиной $f = 1,1 \div 1,3$ Гц. При $f > 1,3$ Гц смерч распадался, т.е. существование огненного смерча можно отнести к классу явлений неустойчивого горения. Центробежная сила, возникающая в результате вращения, должна уравновешиваться силой, появляющейся вследствие понижения давления, обусловленного уменьшением плотности газа на оси смерча. Кроме того, на образование смерча будут влиять силы трения и тяжести. То есть формирование и функционирование огненного смерча будут определяться действием четырех сил: плавучести, тяжести, трения и силы, обеспечивающей закрутку вихря.

Безразмерный критерий, характеризующий вращательное движение частиц в смерче F , определяется соотношением [4]:

$$F = \nu h_c V_z / \Gamma^2, \quad (1)$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости газа в смерче; $\Gamma = 2\pi r V_\tau$ — циркуляция скорости.

Для оценки мощности тепловыделения от продуктов сгорания вводится безразмерный критерий Остроградского Os , используемый для описания конвективных течений [20]:

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

где Q — объемное тепловыделение; S — площадь поверхности горения; q — измеренная плотность теплового потока на высоте $z = 10^{-2}$ м; λ — теплопроводность среды.

При расчете критериев F и Os брались результаты измерений высоты смерча $h_c = 0,4 \div 1,0$ м, значений $T_0 = 900 \div 1200$ К, скоростей V_z и V_τ на высоте 0,1 м (высота начала формирования смерча), радиуса смерча по результатам фоторегистрации. Коэффициент кинематической вязкости $\nu = (2,4 \div 4,1) \cdot 10^{-4}$ м²/с взят из работы [10].

Результаты расчета критериев F и Os приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения безразмерных критериев подобия при различных способах моделирования

Тип установки	F	Os
Закрутка основания	0,67	9,22
Закрутка сверху	0,74	7,96
Подложка в горизонтальном потоке	0,76	9,34

Следует обратить внимание на сравнение результатов, полученных в лабораторных условиях,

с характеристиками огненных смерчей, возникающих в природе [1]. Безразмерная комбинация h_c/r в экспериментах составляла $20 \div 30$. При увеличении радиуса смерча до 100–200 м тангенциальная скорость на периферии V_τ возрастает до 80–160 м/с, т.е. до значений, близких к натурным. Следовательно, наблюдается геометрическое и гидродинамическое подобие.

Близость значений критериев подобия ($F = \text{idem}$, $Os = \text{idem}$) для разных способов формирования огненного смерча доказывает, что этот процесс не зависит от способа закрутки газового потока и выбранные безразмерные величины являются критериями подобия решаемой задачи.

Используя условие локального механического равновесия смерча и вращающейся платформы [13], а также экспериментальные результаты, полученные в [14, 15], нам удалось получить полуэмпирическую формулу для критической (равновесной) частоты вращения платформы, при которой имеет место огненный смерч:

$$f = a_* \left(\frac{2gh_c(T_0 - T_e)}{T_e} \right)^{0,5} r^{-1}. \quad (3)$$

Здесь T_e — температура окружающей среды; a_* — эмпирическая константа; g — ускорение силы тяжести.

Из анализа (3) следует, что с ростом высоты h_c величина f при прочих условиях растет, а с ростом r — убывает, что согласуется с априорными физическими соображениями и опытными данными.

Формула (3), с точностью до постоянной a_* , совпадает с формулой, полученной в работах [13–15]. В табл. 6 приведены результаты оценки величины a_* . Среднее значение $a_* = 0,8 \cdot 10^{-2} \pm 0,45 \cdot 10^{-2}$.

Таблица 6

Результаты оценки постоянной a_* и ошибки измерений δa_* , определенные из измерений частоты вращения f , температуры газа на оси и радиуса смерча на высоте $z = 0,1$ м

f , Гц	T_e , К	T_0 , К	r , 10^{-2} м	h_c , м	a_* , 10^{-2}	$\pm \delta a_*$, 10^{-2}
1,1	300	927	2,4	0,47	0,602	
1,2	300	1008	2,6	0,59	1,365	0,45
1,3	300	1190	2,8	0,69	0,575	

Исследования условий возникновения и устойчивого горения, определение безразмерных критериев подобия, которые описывают гидродинамические и тепловые явления в подобных структурах различного размера, создают принципиальную возможность применения пассивных и активных (с использованием источников излучения) оптических методов измерения параметров реальных огненных смерчей по результатам исследования в лабораторных условиях.

Заключение

В лабораторных условиях несколькими независимыми способами были получены огненные смерчи.

Эксперименты показали, что огненный смерч возникает при всех типах взаимодействия атмосферного смерча с очагом пожара, при частоте вращения основания $f = 1,1 \div 1,3$ Гц. Он состоит из очага горения, конвективной колонки и колоннообразного облака продуктов горения.

Характерным признаком появления огненного смерча является резкий рост высоты факела пламени, что объясняется увеличением притока окислителя, появлением колоннообразного фронта диффузионного горения газообразных продуктов пиролиза и локального равновесия центробежной силы и внешней силы давления. При этом, как показывает анализ треков частиц алюминия, траектории нагретых частиц продуктов сгорания напоминают винтовые линии с изменяющимся радиусом кривизны над очагом пожара.

Установлено, что стационарное состояние огненных смерчей мало зависит от способов их получения, реализованных в экспериментах, и типа использованных в работе горючих материалов.

В частном случае горения жидкого топлива полученные экспериментальные данные согласуются на качественном уровне с результатами аналитических исследований [13–15].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 08-01-00496.

1. Кэрвер Г.Ф., Фенделл Ф.Е., Фелдман П.С. 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. 407 с.
3. Гостинцев Ю.А., Рыжов А.М. Численное моделирование динамики пламени, огненных вихрей и штормов при пожарах на открытом пространстве // Изв. РАН. Мех. жидкости и газа. 1994. № 6. С. 52–61.
4. Интенсивные атмосферные вихри / Под ред. Л. Бенгтссона, Дж. Лайтхилла М.: Мир, 1985. 368 с.
5. Никулин В.В. Распад вертикального торнадоподобного вихря // Прикл. мех. и техн. физ. 1992. № 4. С. 42–47.
6. Никулин В.В. Движение завихренной жидкости в ядре вертикального торнадоподобного вихря // Прикл. мех. и техн. физ. 1995. Т. 36. № 2. С. 81–87.
7. Сенницкий В.Л. Модель смерча // Вестн. НГУ. 2001. Вып. 1. С. 103–106.
8. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2003. 504 с.
9. Бубнов Б.М. Термическая структура и турбулизация торнадоподобных вихрей от локализованных источников тепла над вращающимся диском // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1997. Т. 33. № 4. С. 434–442.
10. Самсонов В.П. Самопроизвольные вихревые структуры в пламени. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 124 с.
11. Snegirev A.Yu., Mardsen J.A., Fransis J., Makhviladze G.M. Numerical studies experimental observation of whirling flames // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 2523–2539.
12. Гришин А.М., Петрин С.В., Петрина Л.С. Моделирование и прогноз катастроф. Часть 3. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 576 с.
13. Гришин А.М. Аналитическое решение задачи о возникновении огненного смерча // Экол. системы и приборы. 2006. № 6. С. 50–51.
14. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В. Физическое моделирование огненных смерчей. // Докл. РАН. 2004. Т. 395. № 2. С. 196–198.
15. Гришин А.М., Голованов А.Н., Колесников А.А., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш. Экспериментальное исследование тепловых и огненных смерчей // Докл. РАН. 2005. Т. 400. № 5. С. 618–620.
16. Гришин А.М., Сазанович В.М., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш. Исследования распространения лазерного излучения через высокотемпературную закрученную струю // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 12. С. 1042–1046.
17. Гришин А.М., Голованов А.Н., Рейно В.В., Сазанович В.М., Строкатов А.А., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В. Экспериментальные исследования огненных смерчей // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 3. С. 237–242.
18. Гришин А.М., Рейно В.В., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В. Экспериментальные исследования огненных смерчей // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 2. С. 158–163.
19. Гришин А.М. Поражающие факторы лесных и степных пожаров и новые способы борьбы с ними // Экол. системы и приборы. 2007. № 6. С. 52–56.
20. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Введение в теорию свободноконвективного теплообмена. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. 224 с.

A.M. Grishin, A.N. Golovanov, Ya.V. Sukov, R.Sh. Tsvyk. Physical modeling of fier tornados.

Three independent methods were used in receiving fier tornados in laboratory conditions. The similitude parameters of a solved problem are found. It is shown, that formation of a fier tornado does not depend on a source of combustion, and is defined by the density of a heat flow.