

На правах рукописи

Дермер Павел Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ГЕНЕРАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
ВОЗДУШНЫХ И ОГНЕННЫХ ВИХРЕЙ**

Специальность 01.04.14 –

Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Леонтьев Александр Иванович**

академик РАН, профессор,

доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Пиралишвили Шота Александрович**

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой «Общая и техническая физика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева"

Снегирёв Александр Юрьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Защита состоится 20 июня 2018 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, ф-т «Энергомашиностроение», ауд. 202 «Э».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан «___» 2018 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.141.08

кандидат технических наук, доцент



Егоров К.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Вихревое движение – одно из самых часто встречающихся состояний течения жидкости или газа. На сегодняшний день накоплен огромный объем материала, связанный с изучением вихревых структур, возникающих в струйных потоках, турбулентных и ламинарных пограничных слоях, в отрывных течениях, при обтекании тел и т.п.

Среди колоссального многообразия вихревых структур выделяются концентрированные вихри – компактные пространственные области с высокими значениями завихрённости, окружённые течением с существенно более низкой (в случае идеальной жидкости – с нулевой) завихрённостью.

Концентрированные вихри широко распространены в земной атмосфере, на Солнце и используются в самых различных технических устройствах (вихревая труба Ранка-Хилша, вихревые топочные камеры и вихревые горелки, циклонные сепараторы, вихреобразующие неоднородности на теплообменных поверхностях и мн. др.).

Концентрированные вихри можно разделить на ограниченные стенками и свободные. Если говорить о первом классе вихрей, то, как правило, такие вихревые потоки формируют с использованием механических закручивающих устройств (вентиляторы, тангенциальный подвод среды, направляющие закручивающие лопатки, шнеки, внутреннее спиральное оребрение, интенсивное вращение подложек и корпусных элементов каналов и т.д.). Вихревые течения данного класса уже давно применяются для повышения устойчивости (стабилизации) процессов горения, в том числе – плохо горящих материалов, таких как низкосортные угли, топлива растительного происхождения и многих других. Примерами технических устройств, в которых сжигание происходит с помощью закрученного течения, являются камеры сгорания циклонного типа и вихревые горелки. Вихревое течение в них обеспечивает интенсивное перемешивание, повышает стабилизацию пламени, что ведёт к значительному увеличению полноты сгорания топлива.

Свободные концентрированные вихри, в частности смерчи – восходящие вихри из быстро вращающегося газа, характеризуются спонтанностью образования и пространственно-временной нестабильностью. Указанные особенности сложно реализуемы в условиях эксперимента и стали причиной того, что к настоящему времени практически полностью отсутствуют экспериментальные работы, посвящённые вопросам генерации, устойчивости и динамики свободных нестационарных концентрированных вихрей.

Особое место в данном классе вихревых течений занимают огненные смерчи. Такие смерчи, по сравнению с воздушными, встречаются достаточно редко, при этом на порядок опаснее их. Огненные смерчи возникают во время крупных степных и лесных пожаров, множественных возгораний в условиях плотной городской застройки, аварий на крупных пожароопасных объектах, при возгораниях на объектах лесоперерабатывающей промышленности, при авариях на нефтепроводах и газопроводах. Огненные смерчи, возникшие во время природных и техногенных пожаров, драматически увеличивают их

опасность и последствия, наносят значительный ущерб, приводят к многочисленным жертвам и разрушениям.

Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2011 году были включены в Перечень критических технологий Российской Федерации. Среди таких технологий – технологии прогнозирования, предупреждения и методы борьбы с разрушительными атмосферными воздушными вихрями и огненными смерчами, возникающими в природе, а также во время техногенных пожаров и катастроф. Однако, создание и развитие таких технологий невозможно без глубокого изучения и понимания причин этих явлений.

Очевидно, что проведение полномасштабного физического моделирования воздушных и огненных вихрей является весьма дорогостоящим мероприятием и сопряжено с большими рисками. Следует подчеркнуть, что в опубликованных исследованиях данные по физическому моделированию вихрей без использования принудительной закрутки практически полностью отсутствуют. Попытки моделирования воздушных смерчей путём закрутки воздуха при помощи вентилятора впервые были предприняты силами Ying S.J., Chang C.C. и Wan C.A. Лишь в 2008 году А.Ю. Вараксиным, М.Э. Ромашем, С.И. Таекиным, В.Н. Копейцевым было показано, что существует способ смоделировать воздушный вихрь без принудительной закрутки. Влияние огненных вихрей на рост скорости горения различных топлив изучался в работах Emmons H.W., Ying S.J., Byram G.M., Martin R.E. В этих и дальнейших исследованиях огненные вихревые структуры получались с использованием различных способов принудительной закрутки. В 2004 году А.Ю. Снегирёвым проведены экспериментальные исследования и численное моделирование среднемасштабных (комнатных) вихревых пожаров в помещении с потолочным вентиляционным отверстием и асимметричным притоком воздуха. В 2007 году Zhou R. и Wu Z.N. показали возможность генерации огненных вихрей над ёмкостью с топливом, окружённой огненными «стенками» различной конфигурации. В 2015 году исследователями Wang P., Liu N., Zhang L., Bai Y., Satoh K. создана экспериментальная установка оригинальной конструкции, не имеющая внешних стенок. Вместо обычных стенок была использована специальная воздушная завеса и созданы условия для тангенциального притока воздуха в зону горения, что и обеспечивало генерацию квазистационарных огненных вихрей.

На сегодняшний день можно констатировать, что имеющийся, причём достаточно ограниченный, объем информации недостаточен для решения проблемы прогнозирования образования, развития и затухания воздушных и огненных вихрей (смерчей). Обязательным этапом на пути решения данной проблемы являются детальные экспериментальные исследования по физическому лабораторному моделированию вихрей без использования принудительной закрутки.

В связи с этим, научно-исследовательская работа, направленная на поиск условий генерации нестационарных воздушных и огненных вихрей без использования принудительной закрутки и организации тангенциального притока воздуха путём проведения физического лабораторного моделирования, является актуальной задачей современной теплофизики.

Цель работы: нахождение условий генерации нестационарных воздушных и огненных вихрей без использования принудительной закрутки. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Создание экспериментальных установок и разработка методик проведения эксперимента для моделирования воздушных и огненных смерчей в лабораторных условиях без использования механической закрутки и организации тангенциального притока воздуха.
2. Выбор методов определения параметров воздушных и огненных вихрей в ходе эксперимента.
3. Проведение экспериментальных исследований по выявлению условий генерации и определению интегральных и энергетических параметров генерируемых воздушных и огненных вихрей.
4. Определение вероятного механизма генерации огненных вихрей.
5. Разработка рекомендаций по переносу полученных в модельных условиях данных на натурные огненные вихревые структуры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показана возможность генерации нестационарных воздушных вихрей путём одновременного нагрева воздуха снизу и его охлаждения сверху.
2. Получены новые экспериментальные данные по условиям генерации нестационарных воздушных вихрей, по количеству наблюдаемых воздушных вихревых структур за один эксперимент, их интенсивности и другим параметрам.
3. Показана принципиальная возможность генерации нестационарных огненных вихрей в лабораторных условиях без использования механических закручивающих устройств и организации тангенциального притока воздуха в зону горения.
4. Получены новые экспериментальные данные по условиям генерации и интегральным параметрам огненных вихревых структур.
5. Предложены критерии подобия для огненных вихрей, наблюдаемых в лабораторных и природных условиях.
6. Предложен вероятный механизм генерации огненных вихрей.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается применением при проведении экспериментальных исследований современных аттестованных средств и систем диагностики, оценкой неопределённостей измерений, многократным повторением экспериментов при фиксированных режимных параметрах, согласованием результатов настоящей работы с полученными ранее на аналогичных режимах экспериментальными данными других авторов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что наблюдаемые в ходе экспериментов воздушные вихревые структуры являются лабораторными аналогами атмосферных вихрей и смерчей; наблюдаемые в ходе экспериментов огненные вихри являются лабораторными аналогами огненных вихрей и смерчей, возникающих в природе при степных и лесных пожарах, возгораниях в условиях плотной городской застройки, на лесоперерабатывающих предприятиях, а также при горении нефти и газа. Найденные условия генерации огненных вихрей при сжигании таблеток горючего могут быть востребованы при проектировании камер сгорания энергетических замкнутых газотурбинных установок, работающих на твёрдом топливе, при оценке и прогнозировании вероятности чрезвычайных ситуаций при пожарах, при разработке технологий предупреждения и борьбы с разрушительными огненными смерчами, а также при проектировании летального оружия. Анализ возможных причин генерации свободных огненных вихрей без использования принудительной закрутки может быть использован при разработке новых методов рекультивации разливов топлива, сжигания с высокой эффективностью и низкой эмиссией, а также при создании новых устройств. Результаты исследований позволяют лучше понять механизмы и причины возникновения воздушных и огненных вихрей и смерчей, а также могут использоваться для валидации математических моделей и программных пакетов численного моделирования.

Методология и методы исследования базируются на базовых положениях классической теплофизики и основаны на экспериментальных измерениях и визуальным наблюдением над объектами исследования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конструкция экспериментальных установок, на которых были получены огненные и воздушные смерчи, и зафиксированы пульсации пламени при горении, а также методики проведения эксперимента.
2. База экспериментальных данных по условиям генерации нестационарных воздушных вихрей.
3. Принципиальная возможность генерации нестационарных огненных вихрей в лабораторных условиях без использования механических закручивающих устройств и организации тангенциального притока воздуха в зону горения.
4. База экспериментальных данных по условиям генерации и интегральным параметрам огненных вихрей.
5. Механизм генерации огненных вихрей.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены и получили одобрение на: IX Всероссийской конференции «Физическая электроника» (ФЭ –2016) (г.Махачкала, 2016 г.); XXI Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Санкт-Петербург, 2017г.); XXIII Сибирском теплофизическом семинаре (г. Новосибирск,

2017г.); X Международной научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» (г. Самара, 2017 г.); 15th UK Heat Transfer Conference (г. Лондон, 2017 г.); заседаниях кафедры газотурбинных и нетрадиционных установок МГТУ им. Н.Э. Баумана (г.Москва, 2017 г.). Основные положения работы были отмечены Дипломом за лучший доклад на XXI Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Санкт-Петербург, 2017г.).

Публикации. Основные положения и выводы изложены в 8 работах, в том числе – в 3 статьях в научных журналах и изданиях, включённых в перечень ВАК при Министерстве образования и науки Российской Федерации (из них – 2 статьи опубликованы в научных журналах, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus), общим объёмом 1,85 п.л.

Личный вклад автора заключается в формулировании поставленных цели и задач исследования; непосредственном участии в планировании и проведении экспериментальных исследований; в обработке и анализе полученных данных; в подготовке публикаций по выполненной работе.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 146 наименований. Весь материал изложен на 149 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков и 9 таблиц.

Содержание работы

Во введении отмечена актуальность темы диссертационной работы, ее теоретическая и практическая значимость, поставлены цели и задачи исследования, отражена научная новизна, дана общая характеристика работы и кратко описано ее содержание.

Первая глава носит обзорный характер и разделена на две части. В первой представлен аналитический обзор работ, посвященных физическому моделированию воздушных вихрей. Вторая часть посвящена обзору экспериментальных исследований огненных вихрей. Проведен анализ существующих методов генерации стационарных ограниченных стенками воздушных и огненных вихрей; описаны имеющиеся работы, в которых авторы изучали квазистационарные неограниченные вихри, рассмотрены различные типы экспериментальных установок, позволяющих производить такое моделирование. Дано описание нового вида огненного вихря – голубого. Рассмотрены работы, в которых изучались вопросы использования огненных вихрей для стабилизации процессов сжигания топлива, утилизации отходов, оптимизации рабочего процесса вихревых горелок.

Сделан вывод о том, что в подавляющем большинстве работ исследовались воздушные и огненные вихревые структуры, генерируемые посредством использования тех или иных закручивающих устройств, либо с помощью организации тангенциального притока воздуха извне. Исходя из проведенного анализа имеющихся опубликованных работ, сделан вывод о

необходимости проведения экспериментальных исследований, направленных на поиск условий генерации нестационарных воздушных и огненных вихрей без использования принудительной закрутки.

В заключение главы проиллюстрированы некоторые примеры огненных вихрей, возникающих в природных условиях и во время техногенных пожаров.

Вторая глава посвящена описанию методов и средств, использованных при проведении настоящих экспериментальных исследований.

Температура подстилающей поверхности измерялась при помощи метода инфракрасной термометрии с использованием инфракрасного цифрового термометра модели AZ8868.

Температура воздуха определялась при помощи термоэлектрического метода. Для этого использовались термоэлектрические преобразователи с чувствительным элементом из термоэлектродов ТП.ХК(Л)-К11. Материал спая – хромель-копель. После каждого 15 пусков производилась калибровка по эталонному термометру. Сигнал с термопар поступал в индикатор температур цифровой шестиканальный ИТБ-6.

Измерение скорости воздуха производилось при помощи метода термоанемометрии. Для этого использовался термоанемометр стик-класса Testo 405-V1, позволяющий проводить измерения скорости, температуры и объёмного расхода воздуха.

Поля скоростей воздуха измерялись с помощью современного метода цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry – PIV). В его основе лежит измерение перемещений мелких частиц (трассеров), находящихся в потоке. В поток газа или жидкости добавляются частицы малого размера (трассеры). Параметры трассеров подбирают таким образом, чтобы различные эффекты, связанные с размером, массой или двухфазностью потока, проявлялись незначительно. Затем в требуемом сечении световым (лазерным) ножом «вырезается» плоскость. Образы частиц регистрируются на цифровую камеру. Далее изображение обрабатывается и рассчитывается перемещение частиц за фиксированный интервал времени. Схема применения метода PIV показана на Рисунке 1.

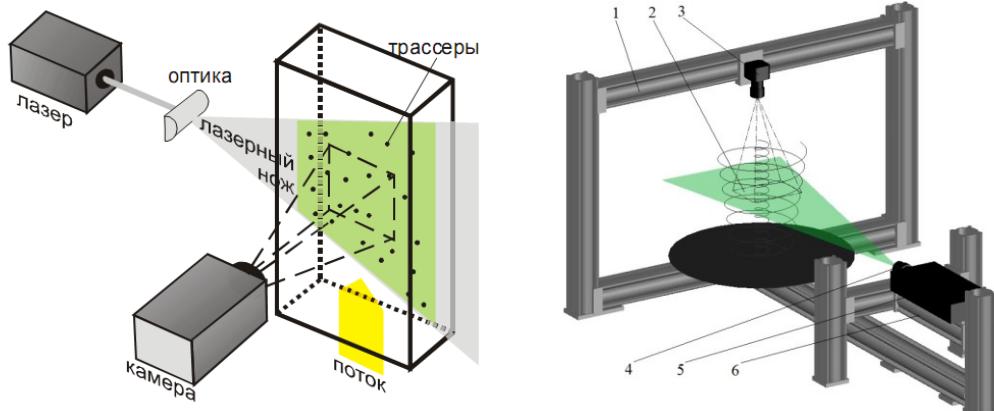


Рисунок 1. Схема метода цифровой трассерной визуализации (PIV)

В экспериментах использовался измерительный комплекс «ПОЛИС», включающий в себя двойной короткоимпульсный Nd:YAG лазер, блок управления, блок питания, две цифровые камеры, синхронизатор, контроллеры. Обработка результатов проводилась при помощи современного персонального компьютера и программного пакета ActualFlow.

Для визуализации образуемых вихревых структур применялись частицы магнезии, а также использовался пар, получаемый при испарении жидкости VDLSL5. Описан выбор параметров твёрдых частиц. В результате проведённых оценок сделан вывод о том, что частицы магнезии диаметром 6 мкм будут практически мгновенно «подстраиваться» под скорость воздуха в вихре и не вносить возмущений в поток.

Видеосъёмка наблюдаемых вихрей осуществлялась с использованием цифровой видеокамеры Sanyo VCC-6572P. Видеосъёмка генерируемых огненных вихрей проводилась с использованием современной ультраскоростной видеокамеры Phantom v1210. Видеокамера предназначена для регистрации быстропротекающих процессов и анализа полученных оптических регистраций и способна производить съёмку со скоростью до 1 млн. кадров в секунду.

Была проведена оценка неопределённостей эксперимента в соответствии с ГОСТ Р 54500.3—2011. Максимальные значения неопределённостей не превышают уровня 15%.

Третья глава посвящена описанию и анализу результатов экспериментов по изучению условий генерации нестационарных воздушных вихрей. Для генерации нестационарных воздушных вихрей была создана установка, позволяющая исследовать образование воздушных вихревых структур при одновременном нагреве воздуха снизу и его охлаждении сверху. Схема установки и её внешний вид показаны на Рисунке 2.

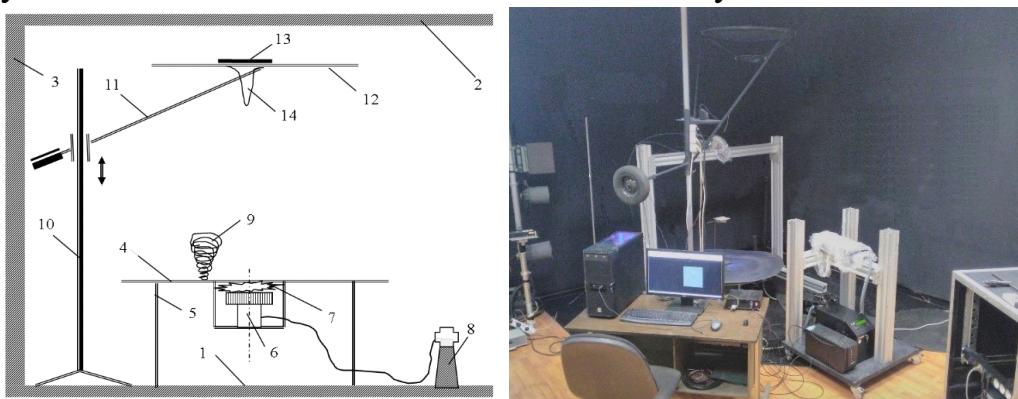


Рисунок 2. Схема и внешний вид экспериментальной установки для генерации свободных нестационарных воздушных вихрей. 1 – пол, 2 – потолок, 3 – стены, 4 – подстилающая поверхность, 5 – стол, 6 – газовая горелка с электрическим поджигом, 7 – пламя горелки, 8 – баллон со сжиженной пропано-бутановой смесью, 9 – наблюдаемые вихревые структуры, 10 – стойка, 11 – штанга, 12 – сетка, 13 – сухой лёд, 14 – нисходящий поток охлаждённого воздуха

Установка представляет собой комплекс, включающий подстилающую поверхность (алюминиевый лист диаметром 1100 мм и толщиной 1,5 мм.), системы нагрева и охлаждения воздуха, а также систему цифровой трассерной визуализации.

Использование «сухого льда» позволяло охлаждать воздух до температуры 3–5°C на расстоянии 50 мм под сеткой. Эксперименты проводились для трёх различных расстояний между сеткой, на которой располагался сухой лёд, и подстилающей поверхностью – 1,1; 1,4 и 1,7 м. Очевидно, что величина вертикального градиента температуры воздуха была максимальной при минимальном расстоянии между подстилающей поверхностью и сеткой. Однако, как показали опыты, добиться устойчивой генерации концентрированных вихревых структур при малых расстояниях (1,1 и 1,4 м) не удалось. Тем не менее, при максимальном расстоянии между поверхностью стола и сеткой (1,7 м) наблюдалась резкая интенсификация процесса генерации воздушных концентрированных вихрей по сравнению со случаем, когда температура воздуха изменялась лишь путём его нагрева газовой горелкой снизу. На Рисунке 3 показаны два выборочных кадра видеосъёмки одного концентрированного воздушного вихря в разные моменты времени.

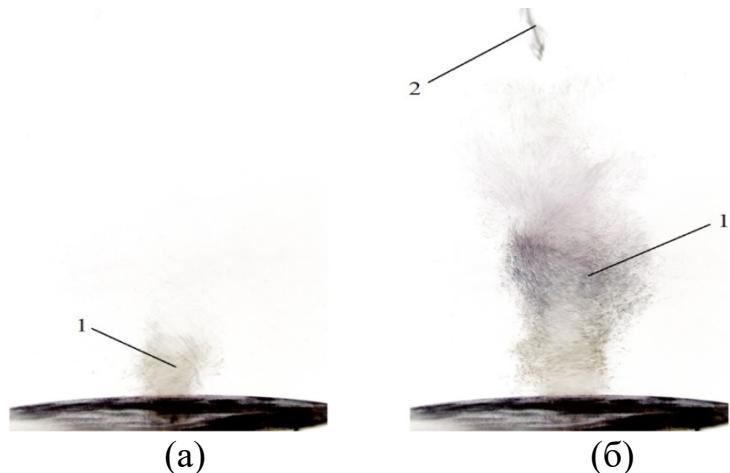


Рисунок 3. Видеосъёмка концентрированного воздушного вихря в разные моменты времени (негатив): а) 0,5 с; б) 2,5 с. Цифрами обозначены: 1 – вихрь, развивающийся снизу от подстилающей поверхности; 2 – вихрь, развивающийся сверху от сетки

На Рисунке 4 показаны мгновенные поля скоростей в момент развития вихревой структуры, выполненные с помощью метода PIV.

Полученные поля скоростей позволяют производить оценки энергии вихрей и изменение энергии в течение времени. Энергия генерируемых вихрей (на единицу высоты) может быть рассчитана как

$$E = \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{U_{zm}^2}{2},$$

где ρ – плотность воздуха; D – диаметр воронки вихря; U_{zm} – среднее интегральное значение вертикальной составляющей скорости в воронке вихря.

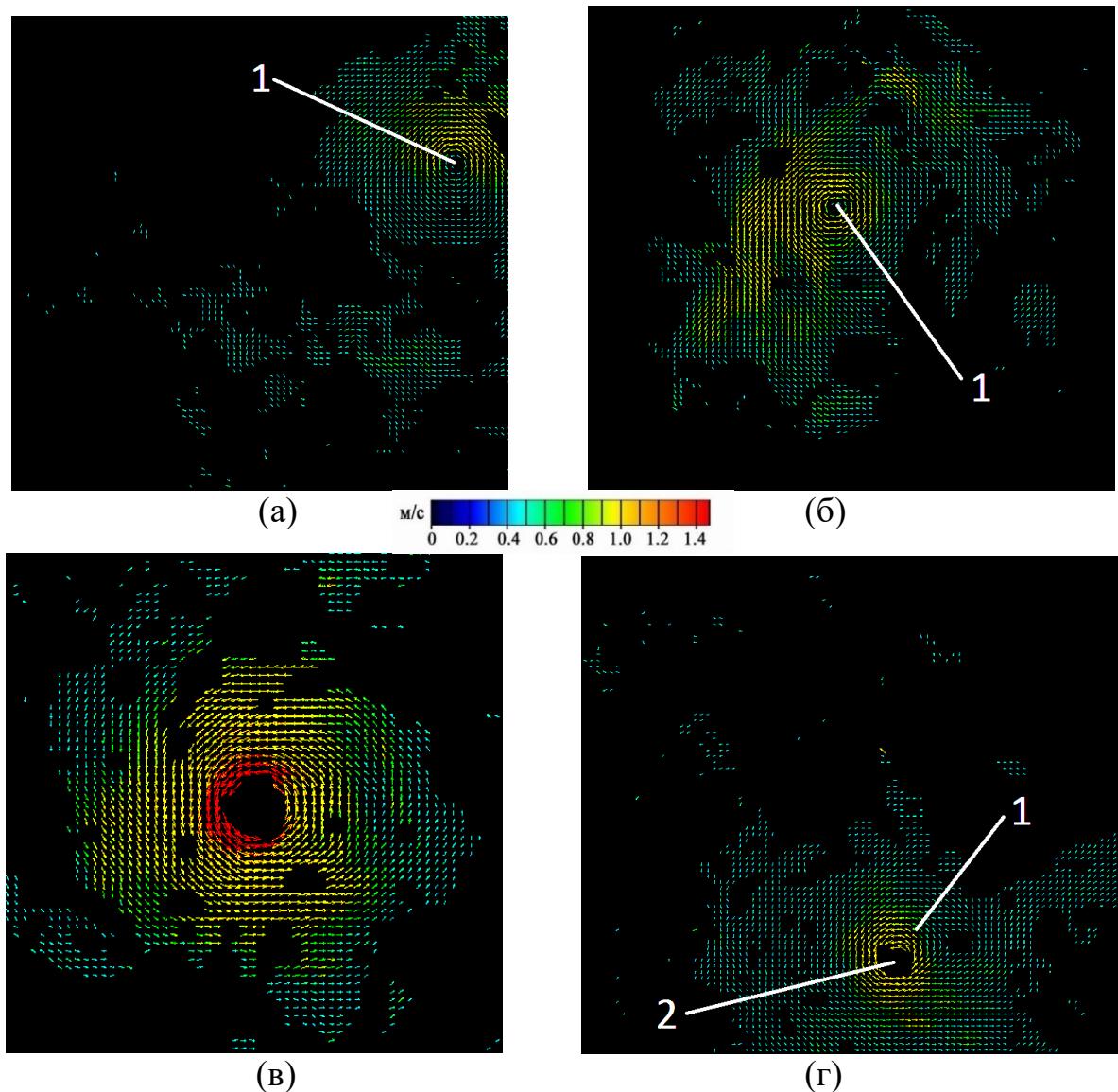


Рисунок 4. Мгновенные поля скоростей в момент развития нестационарного воздушного вихря: а) $\tau=3\text{с}$, б) $\tau=7\text{с}$, в) $\tau=15\text{с}$, г) $\tau=22\text{с}$. Цифрами обозначены:
1 – нестационарный воздушный вихрь; 2 – сформированный «глаз» вихря

Среднее интегральное значение азимутальной составляющей скорости определяется как

$$U_{\varphi m} = \frac{1}{R^2} \int\limits_o^R U_\varphi(r) r dr.$$

Здесь r – расстояние от центра вихря; R – условный радиус воронки вихря (расстояние от центра вихря, на котором значение скорости равно половине максимальной скорости,); $U_\varphi(r)$ – распределение азимутальной скорости в поперечном сечении воронки вихря.

Учитывая большую пространственно-временную неоднородность генерируемых вихрей, можно ввести понятие средней интегральной (за время жизни) энергии вихревой структуры в следующем виде

$$E = \frac{1}{\tau_{\max}} \int_0^{\tau_{\max}} E(\tau) d\tau,$$

где τ – время; τ_{\max} – время жизни вихря; $E(\tau)$ – зависимость энергии вихря от времени.

Максимальное значение мгновенной энергии вихрей (на единицу высоты), полученное с использованием измеренных полей скоростей составляло $5 \cdot 10^{-3}$ Дж/м для случая одновременного нагрева воздуха снизу и его охлаждения сверху, что в 2,86 раз превышает аналогичное значение для вихрей, полученных при одном лишь нагреве снизу.

На Рисунке 5 представлены результаты серии экспериментальных исследований по определению количества генерируемых вихрей при двух разных способах стратификации воздуха – одновременном нагреве воздуха снизу и его охлаждении сверху и лишь нагреве воздуха снизу.

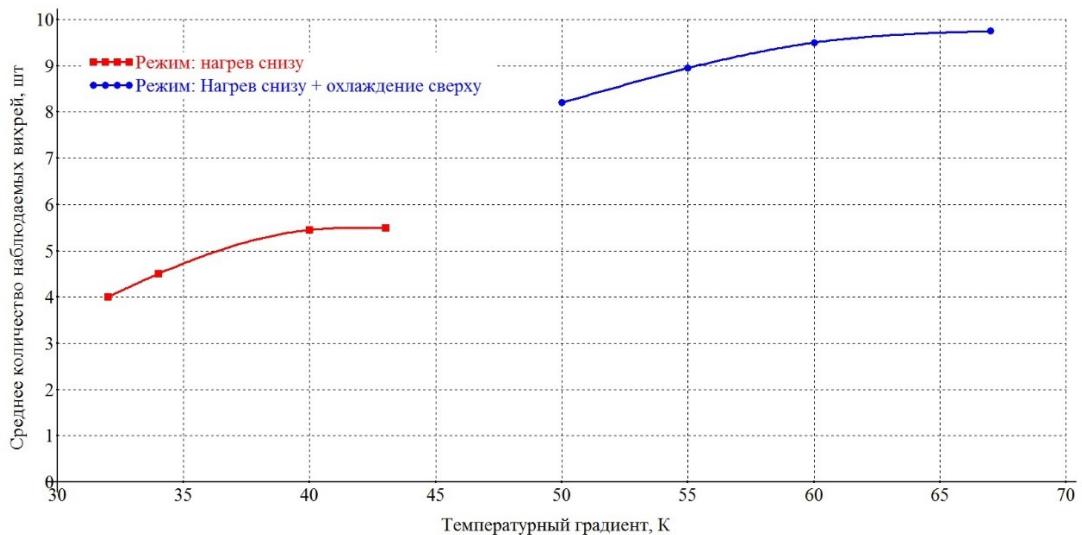


Рисунок 5. Результаты экспериментальных исследований по определению количества генерируемых вихрей при двух разных способах стратификации воздуха

В результате выполненных экспериментальных исследований показано, что количество генерируемых вихрей при одновременном нагреве и охлаждении воздуха превосходило (в среднем на 60-65%) аналогичный показатель при одном лишь нагреве воздуха снизу. Время жизни вихрей при одновременном нагреве снизу и охлаждении сверху превышало (на 40-50%) время жизни вихрей при одном лишь нагреве воздуха снизу. Это позволяет сделать однозначный вывод об интенсификации процесса вихреобразования при одновременном нагреве и охлаждении воздуха.

Четвёртая глава посвящена описанию и анализу результатов экспериментов по изучению условий генерации нестационарных огненных вихрей. Для генерации нестационарных огненных вихрей использовалась установка, аналогичная описанной в третьей главе. Перед проведением экспериментов в центральной части подстилающей поверхности размещались

таблетки уротропина 6 ($C_6H_{12}N_4$). Масса каждой таблетки – 21 г (диаметр – 40 мм). Теплота сгорания уротропина – 30 МДж/кг.

Эксперименты проводились для разного числа таблеток и их расположения на подстилающей поверхности (Рисунок 6). Первый, второй и третий режимы соответствовали случаям горения 1, 7 и 19 таблеток соответственно. Режим №1 соответствует горению одной таблетке. Для работы на режиме №2 на подстилающей поверхности дополнительно располагались 6 таблеток по окружности с диаметром 130 мм. Для режима №3 на подстилающей поверхности располагались ещё 12 таблеток. При работе на режимах №4 и №5 использовались 7 и 19 таблеток горючего соответственно. В отличие от режимов №2 и №3 центры дополнительных 6 таблеток на режиме №4 и 12 таблеток на режиме №5 располагались на окружностях больших диаметров – 260 и 520 мм соответственно.

При проведении эксперимента таблетки поджигались, формируя пламёна. В процессе горения таблеток наблюдалась генерация огненных вихрей, высота которых, как правило, существенно превосходила среднеинтегральную высоту пламени над областью расположения горючего.

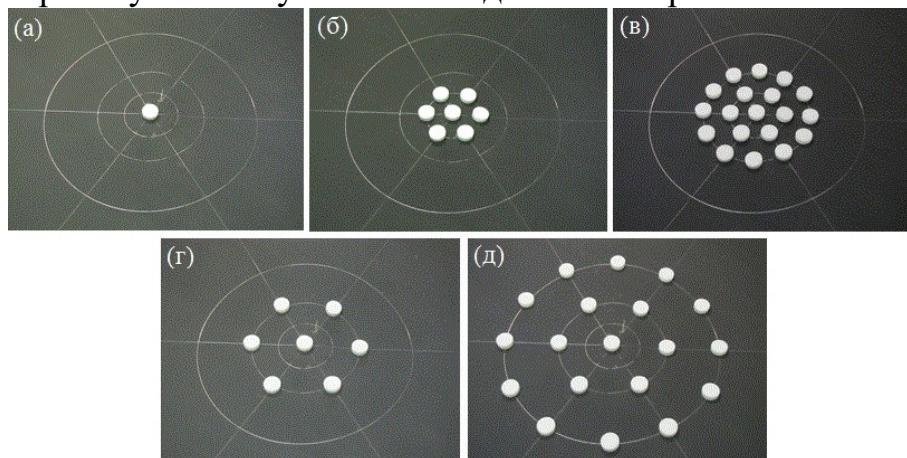


Рисунок 6. Схема расположения таблеток горючего на подстилающей поверхности: а) режим № 1; б) режим № 2; в) режим № 3; г) режим № 4; д) режим № 5

В процессе горения таблеток при режимах №2-№5 наблюдалась генерация огненных вихревых структур, высота которых, как правило, значительно (до нескольких раз) превосходила среднеинтегральную высоту фронта пламени над областью расположения горючего. При этом признаком возникновения огненных вихревых структур также являлось появление винтовых траекторий у нагретых частиц продуктов сгорания. Генерация огненных вихревых структур происходила как в центре области расположения горючего, так и на ее периферии. Количество фиксируемых огненных вихрей – до 15 за один эксперимент. Несколько раз в экспериментах наблюдалась практически одновременная генерация сразу двух огненных вихревых структур. Время жизни подавляющего большинства генерируемых вихрей составляло от 0,7 до 3 с; наибольшая высота огненных вихрей достигала 0,9 м, а их максимальный диаметр – 0,05 м. Выборочные кадры с типичным

зафиксированным огненным вихрем при работе на режиме № 3 показаны на Рисунке 7.

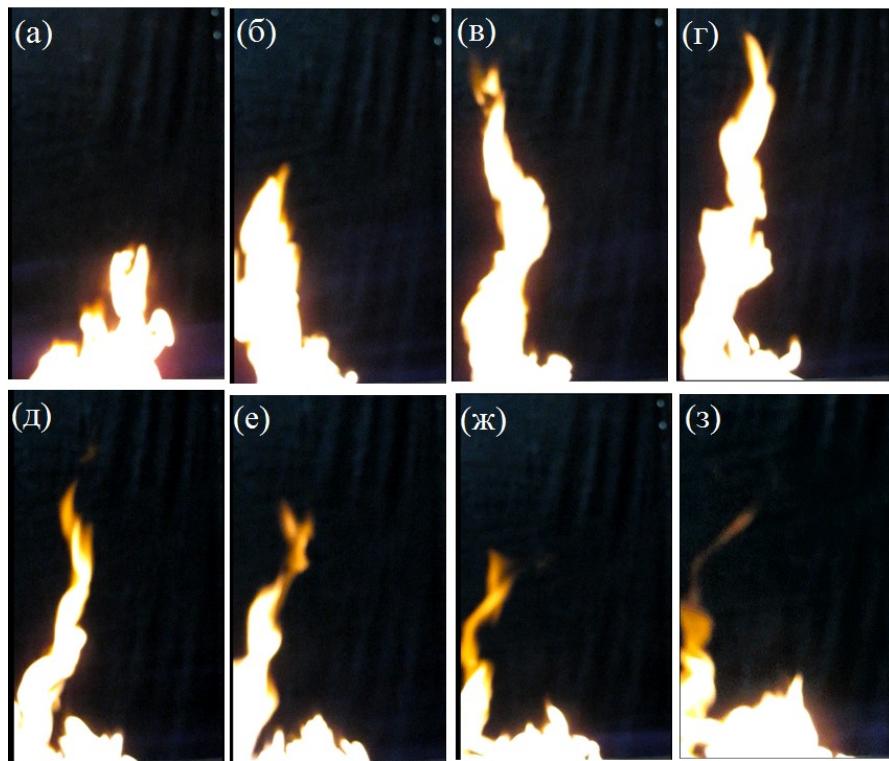


Рисунок 7. Выборочные кадры с зафиксированным огненным вихрем в разные моменты времени, режим № 3:

а) $\tau = 0$; б) 0,8 с; в) 1,1 с; г) 1,28 с; д) 1,52 с; е) 1,76 с; ж) 1,88 с; з) 1,94 с

Жизненный цикл показанной вихревой структуры составлял примерно 2с. Его можно разделить на две основные стадии: генерация и формирование вихря, сопровождающееся увеличением его высоты (Рисунок 7 а–г); ослабление и распад вихря, выражющееся в уменьшении высоты пламени (Рисунок 7 д–з). Максимальная высота данного вихря равнялась 0,9 м и примерно в 3 раза превышала среднеинтегральную высоту пламени в момент его генерации. Процесс формирования огненного вихря сопровождается заметным радиальным притоком воздуха со всех направлений к нижней части основного конвективного потока и сопутствующим закручиванием потока относительно вертикальной оси вследствие наличия градиентов скоростей и температур.

В ходе экспериментов был найден один из эффективных способов регистрации огненных вихрей. Он основан на анализе пульсаций высоты пламени (Рисунок 8). Исследования показали, что характерная частота пульсаций обычного пламени равна 10 Гц; амплитуда пульсаций 25–30%. В случае генерации вихря наблюдался стремительный рост высоты пламени. При этом высота пламени пульсировала в течение всего жизненного цикла вихревой структуры с характерной частотой пульсаций 4–5 Гц.

Результаты экспериментов можно представить в виде зависимости среднего количества наблюдаемых огненных вихрей от относительной площади поверхности, занятой горючим веществом (Рисунок 9).

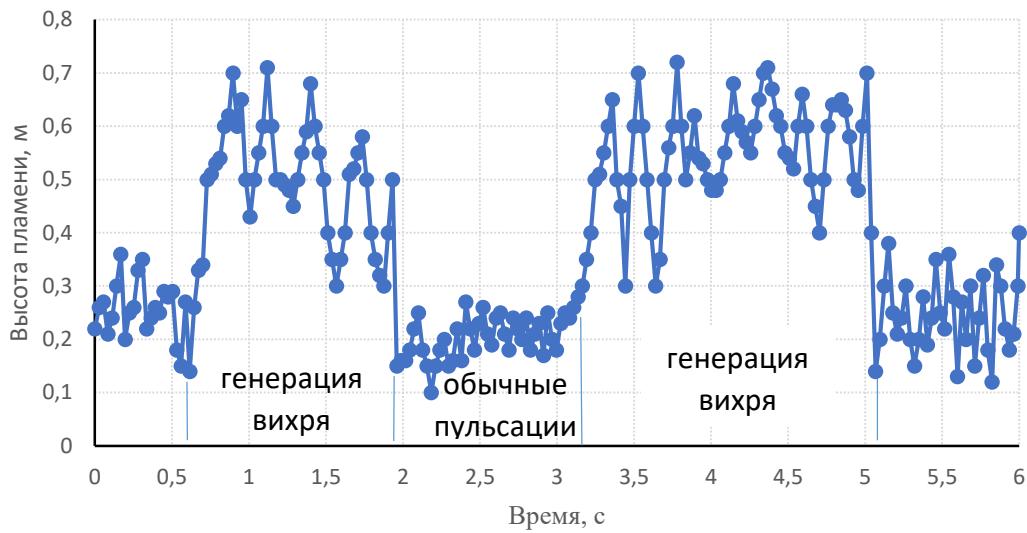


Рисунок 8. Пульсации высоты пламени при обычном горении и в случае генерации вихря

Сделан вывод о том, что в случае, если площадь поверхности осесимметрично расположенных таблеток твёрдого горючего составляет 0,25-0,4 от общей площади области, в которой эти таблетки расположены, то вероятность возникновения огненных вихрей и их количество максимальны.

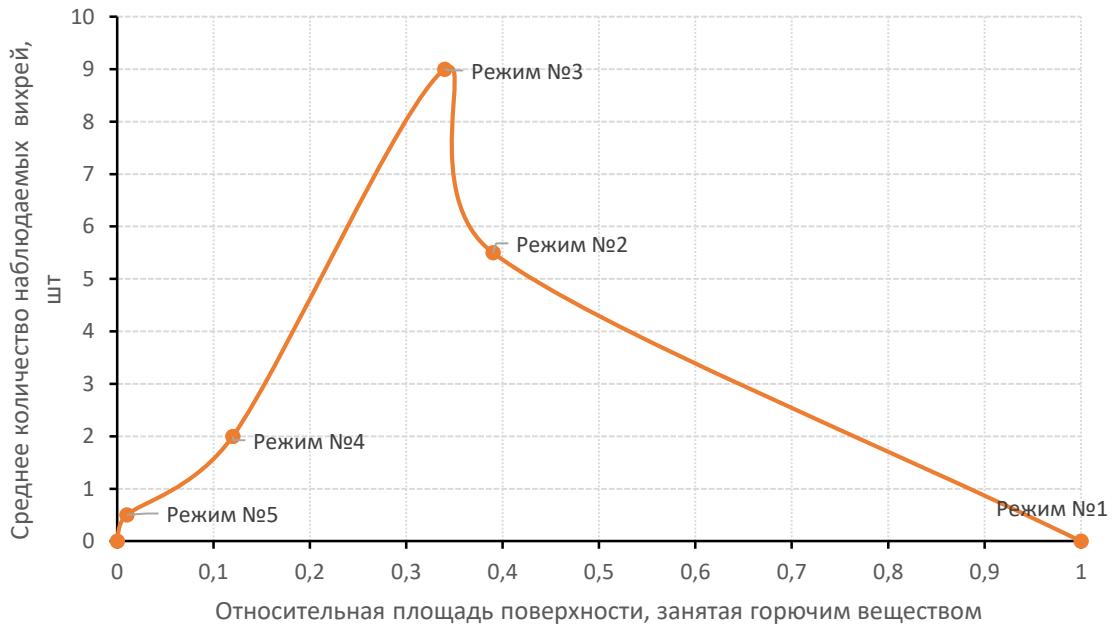


Рисунок 9. Зависимость среднего количества наблюдаемых огненных вихрей от относительной площади поверхности, занятой горючим веществом

Описана серия дополнительных экспериментальных исследований, проводимых на базе лабораторного измерительного комплекса «Волна» научно-экспериментального комплекса «Фундаментальные и прикладные исследования физики быстропротекающих процессов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Установка состояла из бронекамеры, современных специализированных осветительных линзовых приборов с линзой Френеля

мощностью 4000 Вт, ультраскоростной видеокамеры Phantom v1210, пульта управления и персонального компьютера. При обработке полученного в ходе экспериментов видеоизображения были зарегистрированы пульсации высоты пламени, невидимые при съёмке обычным фотоаппаратом. Сделан вывод о том, что именно такие пульсации являются причиной возникновения огненного вихря.

Дано объяснение вероятной причины генерации нестационарных огненных вихрей в процессе сжигания симметрично расположенных таблеток горючего. Это происходит в силу нарушения начального баланса между градиентами скоростей и возникновению составляющих вектора завихрённости. Кроме того, пульсации высоты пламени над отдельно взятой таблеткой твёрдого горючего приводят к генерации флуктуаций всех термодинамических параметров (в том числе, давления и плотности) над этой таблеткой. Указанные пульсации давления и плотности вызывают появление соответствующего локального градиента давления в азимутальном направлении $\partial p / \partial \varphi$. Возникновение азимутального градиента давления в локальных областях пространства является возможной причиной появления азимутальной скорости, приводящей к генерации нестационарных огненных вихрей.

В конце главы приведены разработанные рекомендации по переносу полученных в модельных условиях данных на натурные огненные вихревые структуры. Для этого предложены двенадцать параметров, характеризующих огненный вихрь (смерч): высота H и радиус r смерча; радиальная U_r , тангенциальная (азимутальная) U_φ и осевая (вертикальная) U_z составляющие скорости смерча в цилиндрической системе координат; T_0 – температура на оси смерча; ρ – плотность газа; μ – коэффициент динамической вязкости; λ – коэффициент теплопроводности; c_p – коэффициент теплоёмкости при постоянном давлении; Q – объёмное тепловыделение; g – ускорение свободного падения. Все двенадцать параметров приводятся к четырём единицам измерения – м, с, кг, К. В соответствии с пи-теоремой составлены восемь безразмерных комплексов, являющихся критериями подобиями для данного явления: числа Прандтля, Грасгофа, критерий Остроградского, вращательный критерий, число Фруда, число Рейнольдса, соотношение радиальной и тангенциальной скоростей, а также отношение высоты и радиуса смерча:

$$\text{Pr} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}, \quad \text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_0 - T_\infty) \cdot r^3 \cdot \rho^2}{\mu^2}, \quad O_S = \frac{4 \cdot Q \cdot r^2}{\lambda \cdot T_0}, \quad F = \frac{\mu \cdot H \cdot U_z}{\rho \cdot \Gamma^2},$$

$$\text{Fr} = \frac{g \cdot H}{U_z^2}, \quad \text{Re} = \frac{\rho \cdot \Gamma}{\mu}, \quad \frac{U_r \cdot r}{\Gamma}, \quad \frac{H}{r}$$

где $\beta = \frac{1}{T_0}$ – температурный коэффициент объёмного расширения теплоносителя, T_∞ – температура окружающей среды, $\Gamma = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot U_\varphi$ –

циркуляция скорости. Показано, что значения выбранных критериев подобия близки для вихрей, полученных в ходе лабораторных экспериментов, и природных огненных смерчей.

Основные результаты и выводы

1. Обобщены результаты опубликованных экспериментальных исследований, посвящённых физическому моделированию воздушных и огненных вихрей. Отмечено, что в опубликованных работах практически полностью отсутствуют данные по моделированию вихрей без использования принудительной закрутки.

2. Созданы экспериментальные установки и разработаны методики проведения эксперимента для моделирования воздушных и огненных смерчей в лабораторных условиях без использования механической закрутки и организации тангенциального притока воздуха.

3. Проведены экспериментальные исследования по выявлению условий генерации и определению интегральных и энергетических параметров генерируемых воздушных и огненных вихрей.

4. Продемонстрирована эффективность одновременного нагрева снизу и охлаждения сверху воздуха для генерации концентрированных нестационарных воздушных вихрей. Показано, что при одновременном нагреве и охлаждении воздуха растут количество генерируемых вихрей (в среднем на 60-65%), их высота (на 30-50%) и время жизни (на 40-50%) по сравнению с аналогичными показателями при одном лишь нагреве воздуха снизу. Зафиксированные значения азимутальных скоростей также увеличивались (с 1,3 до 2,2 м/с) при одновременном нагреве и охлаждении воздуха. Энергия вихря при одновременном нагреве воздуха снизу и охлаждении сверху увеличивается в 2,86 раз по сравнению с энергией вихря, полученного только при нагреве воздуха снизу.

5. Получены новые данные по интегральным (время жизни, видимая высота, видимый диаметр) и энергетическим параметрам генерируемых нестационарных воздушных вихрей.

6. Продемонстрирована принципиальная возможность генерации концентрированных огненных вихрей при горении осесимметрично расположенных таблеток твёрдого топлива без использования механических закручивающих устройств и организации тангенциального притока воздуха в зону горения.

7. Выявлены условия генерации (количество таблеток, время начала генерации, мощность тепловыделения) нестационарных огненных вихрей. Показано, что вероятность возникновения огненных вихрей и их количество максимальны в случае, если площадь поверхности осесимметрично расположенных таблеток твёрдого горючего составляет 0,25-0,4 от общей площади области, в которой эти таблетки расположены.

8. Получены новые данные по интегральным характеристикам (время жизни, высота, диаметр) генерируемых нестационарных огненных вихрей.

9. Показано, что эффективным признаком возникновения огненного смерча является резкий рост (в 2-3 раза) высоты пламени. При этом признаком возникновения огненных вихревых структур также являлось появление винтовых траекторий у нагретых частиц продуктов сгорания.

10. Предложены критерии подобия и разработаны рекомендации по переносу полученных в модельных условиях данных на натурные огненные вихревые структуры.

11. Предложен вероятный механизм генерации огненных вихрей.

Основные положения диссертационной работы изложены в следующих работах:

1. Дермер П.Б., Вараксин А.Ю. Физическое моделирование нестационарных огненных вихрей при горении таблеток твёрдого топлива // Безопасность в техносфере. 2016. № 3. С. 65–70. (0,8 п.л./0,4 п.л.).
2. Dermer P.B., Varaksin A.Y., Leontiev A.I. The Wall-Free Non-Stationary Fire Whirls Generation by Axisymmetric Burning of Solid Fuel Pellets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 110. P. 890–897. (0,75 п.л./0,25 п.л.).
3. Дермер П.Б., Вараксин А.Ю. Анализ процесса генерации воздушных вихрей при различных режимах нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Естественные науки. 2018. № 1. С. 84–94. (0,96 п.л./0,48 п.л.).
4. Дермер П.Б., Вараксин А.Ю. Изучение условий генерации нестационарных огненных вихрей при осесимметричном горении твердого топлива // Физическая электроника: Материалы IX Всероссийской конференции ФЭ-2016 (19-22 октября 2016 г.). Махачкала: ИПЦ ДГУ. 2016. С. 34–39. (0,2 п.л./0,1 п.л.).
5. Дермер П.Б. Экспериментальное исследование условий генерации нестационарных огненных вихрей // В книге «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Материалы XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов. М.: Издательский дом МЭИ. 2017. С. 90–91. (0,12 п.л./0,12 п.л.).
6. Дермер П.Б. Экспериментальное исследование условий генерации нестационарных огненных вихрей // В книге «XXXIII Сибирский теплофизический семинар». Материалы Всероссийской конференции. Новосибирск: ИТ СО РАН. 2017. С. 110. (0,1 п.л./0,1 п.л.).
7. Дермер П.Б. Изучение возможности генерации свободных нестационарных огненных вихрей // Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Сборник трудов X Международной научно-технической конференции. Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева. 2017. С. 25–28. (0,2 п.л./0,2 п.л.).
8. Dermer P.B. The Generation of Free Non-Stationary Fire Whirls by Axisymmetric Burning of Solid Fuel Pellets // Proc. 15th UK Heat Transfer Conference. London: Brunei University London. 2017. P. 155. (0,2 п.л./0,2 п.л.).