

На правах рукописи



Алексеев Максим Михайлович

**ГИДРОДИНАМИКА И СТРУКТУРА
ОБРАЩЕННОГО ОПРОКИНУТОГО ПЛАМЕНИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики факультета автоматизации и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Самсонов Виктор Петрович
(ГОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Голованов Александр Николаевич
(ГОУ ВПО «Томский государственный университет»)

доктор технических наук, профессор
Третьяков Павел Константинович
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)

Ведущее предприятие: ГОУ ВПО «Казанский государственный университет», г. Казань

Защита состоится 19 июня 2009 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 239 (корпус НИИПММ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Автореферат разослан «_____» мая 2009 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Среди первостепенных актуальных задач научных и прикладных исследований научным советом по горению и взрыву РАН отмечены следующие направления:

- описание развития гидродинамической неустойчивости фронта пламени и турбулентное горение;
- разработка способов управления сгоранием топлива в энергетических и силовых установках для достижения высокой эффективности при низком уровне вредных выбросов;
- создание и развитие оптических методов диагностики процессов горения.

Течение среды с фронтальными химическими реакциями вблизи тела, формирующего пограничный слой, вызывает значительный научный и практический интерес в связи с фундаментальными проблемами теории турбулентности и возможностью существенной интенсификации процессов тепломассообмена. Построение теорий, адекватно отражающих формирование и устойчивость фронта пламени, а также процессы переноса вблизи него сопряжено с недостатком экспериментальных данных. Сведения о закономерностях формирования пограничного слоя вблизи тела обтекания очень малых размеров в научной литературе отсутствуют вообще. Закономерности стабилизации пламени и горения газов вблизи тела обтекания, имеющего характерный размер, сравнимый с тепловой толщиной фронта, практически не изучены.

В промышленных горелках наиболее распространенным способом интенсификации процессов горения и теплообмена является принудительная закрутка газа в камере сгорания. Достижение необходимого эффекта связано с увеличением интенсивности закрутки, которая требует дополнительных энергетических затрат. Известно, что опрокидывание пламени позволяет достигнуть скорости вращательного движения газа того же порядка, что и в диссипативных вихревых структурах Рэлей-Бенара, Марангони и в течениях с принудительной закруткой. Наличие поверхности стабилизатора или стенок камеры сгорания позволяет создать необходимые направление и величину теплового потока из зоны горения.

Сопутствующими физическими эффектами, определяющими развитие вихревых структур, являются: немонотонное и неоднородное распределение концентраций компонент горючей смеси, харак-

терное преломление линий тока во фронте обращенного пламени и гидродинамическое растяжение фронта пламени (стретч-эффект).

В настоящее время имеются лишь отдельные теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении.

Цель диссертационной работы состоит в получении закономерностей формирования обращенного пламени на тонких стабилизаторах с толщиной, меньшей тепловой ширины фронта пламени, расположенных вдоль или поперек потока заранее перемешанной горючей газовой смеси и исследовании устойчивости горения и влияния вихреобразования в обращенном пламени на интенсивность теплопередачи из зоны горения в стенки камеры сгорания.

Достижение указанной цели требует решения ряда научных задач:

- разработка экспериментальной установки и методики комплексного изучения гидродинамических и теплофизических явлений, происходящих при обращении и опрокидывании газозвдушной пламени;
- разработка системы и методов визуализации течений в пламени, расчета температурных и концентрационных полей;
- определение областей устойчивости обращенного пламени в различных граничных условиях, создаваемых в модельном горелочном устройстве при изменении безразмерных критериев Рейнольдса, Пекле, Карловица;
- изучение тепловой структуры пламени и ее влияния на тепломассообмен в модельной камере сгорания;
- построение физической модели формирования вихревых структур в обращенном пламени и их влияния на интенсивность процессов теплопередачи из зоны пламени в стенки камеры сгорания.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

1. Предложен новый способ стабилизации обращенного пламени при расположении струны-стабилизатора вдоль оси струи газозвдушной смеси.

2. Экспериментально определены границы устойчивости обращенного пламени в координатах чисел Рейнольдса, Карловица и диффузионного числа Пекле. Подтверждена гипотеза о влиянии пограничного слоя, формирующегося на стабилизаторе, на границы устойчивости.

3. Получены новые данные о влиянии обращения и опрокидывания газовоздушного пламени на тепловую структуру пламени. Определены условия влияния стенок модельной камеры сгорания на устойчивость горения.

4. Изучены закономерности влияния вихревых структур на интенсивность процессов тепломассообмена. Установлено, что тепловой поток из зоны пламени к стенкам модельной цилиндрической камеры сгорания увеличивается на 20%.

5. Обнаружены гистерезисные явления при формировании обращенного пламени в координатах в виде зависимостей геометрических параметров пламени от скорости газовоздушной смеси.

6. Обнаружено и изучено явление дрейфа пламени вдоль стабилизатора.

7. Предложены новые оригинальные методы диагностики процессов горения: а) метод цифровой фотометрии исследования температурного и концентрационного полей прозрачного пламени; б) метод муарового аналога интерференции для измерения глубины выгорания поверхности теплообмена.

8. Предложено качественное описание физического механизма формирования вихревых структур в обращенном пламени и их влияния на интенсивность процессов тепломассообмена. Показано, что формирование вихревых структур в опрокинутом обращенном пламени происходит под влиянием встречной струи восходящих продуктов горения и обусловлено характерным профилем скорости газа с перегибом, формирующимся в пограничном слое.

На защиту выносятся:

1. Комплексная методика экспериментального исследования структуры обращенного пламени и вихревых течений, позволившая визуализировать поля скоростей, произвести измерения полей температур, измерить величину тепловых потоков из зоны горения на поверхность камеры сгорания, установить физические процессы, приводящие к вихреобразованию и увеличению интенсивности теплообмена.

2. Экспериментальные результаты, подтверждающие: а) влияние профиля скорости газа на границы устойчивости обращенного пламени в открытой атмосфере, в полуоткрытой цилиндрической трубе и в плоском канале Хил-Шоу; б) влияние профиля скорости газа на расширение области формирования вихревых структур в координатах чисел Рейнольдса по сравнению с необращенным пламе-

нем; в) изменение интенсивности теплопередачи на поверхность теплообмена при перестройке потенциального течения в вихревое.

3. Экспериментальное и теоретическое обоснование предлагаемых физических механизмов самоорганизации стационарных вихревых структур в пламени, согласно которому спонтанная самоорганизация вихревых течений вызвана: а) характерным профилем скорости газа в газовоздушной струе, формирующимся под влиянием пограничного слоя; б) свободно-конвективной неустойчивостью, в зависимости от ориентации фронта пламени и направления его распространения относительно вектора ускорения свободного падения.

4. Экспериментальное и теоретическое обоснование предлагаемых физических механизмов самопроизвольного дрейфа пламени вдоль вертикально расположенного стабилизатора-струны, согласно которому скорость дрейфа пламени связана с прогревом стабилизатора. Гистерезис геометрических параметров пламени в зависимости от скорости газовоздушной смеси обусловлен дрейфом пламени вдоль стабилизатора.

Практическая ценность и внедрение результатов диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Обнаруженные закономерности формирования обращенного пламени и изменения его структуры дополняют представления о возможных причинах и условиях спонтанного вихреобразования при малых числах Рейнольдса, влиянии вихревой структуры на неустойчивость горения, скорость и полноту сгорания топлива, величину и направление теплового потока из зоны горения.

2. Полученные количественные данные могут быть использованы для разработки горелочных устройств с новыми эксплуатационными характеристиками, а также для повышения экономичности камер сгорания.

3. Оригинальные методы диагностики пламени могут применяться для широкого круга объектов исследования, связанных с горением и низкотемпературной плазмой.

4. Диссертационная работа выполнялась на кафедре экспериментальной физики Сургутского государственного университета (2005–2008 гг.). Разработанные методы диагностики пламени применялись в экспериментальных исследованиях горения газовых и конденсированных систем, выполнявшихся по госбюджетной теме кафедры экспериментальной физики СурГУ. Госбюджетная тема зарегистрирована во ВНИИЦ за № 0120.0 802766. Выполнение рабо-

ты поддержано 2 грантами и 2 премиями Губернатора Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в 2006 и 2007 годах.

Апробация работы. Основные результаты работы, изложенные в диссертации, опубликованы в работах [1–9] и докладывались на:

IX-ом Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, Россия, 2006 г.);

13-ой Международной конференции по аэрофизическим методам исследования (Новосибирск, 2007 г.);

Международной конференции «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии (Томск, 2007 г.);

9-ом Международном Симпозиуме по самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (Дижон, Франция, 2007 г.);

8-ой научной конференции «Наука и инновации 21 века» (Сургут, 2007 г.);

9-ой научной конференции «Наука и инновации 21 века» (Сургут, 2008 г.).

Количество основных работ по диссертации – 9.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 94 наименований и 2 приложений. Общий объём составляет 128 страниц, включая 44 рисунка.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых в диссертации исследований, изложены: цель работы, научная новизна, научная и практическая ценность, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена структура и объём диссертации.

В первой главе приводится обзор работ, посвященных особенностям течения газа при обращении пламени на теле обтекания, влияния обращения и опрокидывания пламени на его структуру и перестройку течения, методам исследования структуры обращенного опрокинутого пламени и теплообмена в вихревом течении.

Обзор литературы показывает, что исследования, посвященные формированию обращенного пламени на бесконечно длинном и тонком стабилизаторе, расположенном параллельно потоку, отсутствуют. Отсутствуют также исследования опрокинутого обращенного пламени, стабилизированного на стабилизаторе, расположенном как параллельно, так и перпендикулярно потоку газа.

Количество работ, посвященных изучению закономерностей формирования вихревых структур в опрокинутых пламенах, ограничено. Остаются малоизученными возможности использования самопроизвольных вихревых структур для повышения интенсивности теплообмена в камерах сгорания и их к.п.д.

Фундаментальные гидродинамические явления, сопровождающие обращение и опрокидывание фронта пламени, такие как формирование вихревых структур при малых числах Рейнольдса, гистерезис параметров пламени и коэффициента теплоотдачи по числу Рейнольдса и Пекле остаются до сих пор неизвестными.

Исходя из недостаточной изученности и важности такого объекта как обращенное и опрокинутое обращенное пламя, сформулирована цель работы и составлена программа исследований.

Во второй главе даны описания разработанных автором экспериментальных установок, методов исследования обращенного и опрокинутого обращенного пламени, описана методика проведения экспериментов.

Объектами исследования являлись обращенное пламя в открытой атмосфере и опрокинутое обращенное пламя в цилиндрической камере сгорания на продольном стабилизаторе, обращенное пламя и опрокинутое обращенное пламя на поперечном стабилизаторе в камере Хил-Шоу.

В качестве горючей газовой смеси использовали смеси пропана с воздухом. Концентрацию пропана в смеси при проведении экспериментов меняли от 3% до 6%. Горючая смесь подавалась на круглую трубку – сопло горелки. Диаметр сопла горелки менялся от 4 до 6 мм. В качестве стабилизатора использовалась стальная проволока диаметром 0,6 мм, которая располагалась вдоль или поперек потока горючей смеси.

При проведении экспериментов с обращенным пламенем было установлено, что опрокидывание пламени относительно направления вектора ускорения свободного падения делает невозможным стабилизацию фронта пламени на продольном стабилизаторе в открытой атмосфере, поэтому горелочное устройство было помещено в цилиндрическую прозрачную камеру сгорания диаметром 28,6 мм. Верхний конец камеры был закрыт диафрагмирующей крышкой, что позволило получить устойчивый фронт пламени.

Камера Хил-Шоу, в которой исследовалось обращенное пламя на поперечном стабилизаторе, представляет собой две параллельные, плоские пластины, которые расположены одна от другой на

малом расстоянии. В качестве одной из стенок могла использоваться плексигласовая пластина. Измерение глубины выгорания пластины методом муарового аналога интерференции позволяло рассчитать распределения температур на поверхности теплообмена.

Пламя, образуемое при горении газовой смеси на стабилизаторе, фотографировали цифровой фотокамерой. Цифровые фотографии позволяли вычислять температурные поля методом цифровой фотометрии и определять следующие параметры фронта обращенного пламени: длину конуса пламени, высоту поднятия конуса пламени над соплом, угол раскрытия конуса пламени, диаметр конуса пламени в зависимости от расхода газовой смеси.

Измерения тепловых потоков из зоны горения обращенного пламени и «опрокинутого» обращенного пламени, образованных на продольном стабилизаторе, осуществляли теплоприемником-калориметром.

Разработанный в рамках работы метод муарового аналога интерференции измерения глубины впадины на поверхности тела достигается путем наложения друг на друга двух изображений периодической структуры. Изображение периодической структуры в виде системы параллельных темных и светлых полос, нанесенной на стеклянную плоскую пластину, накладывается на исследуемый участок поверхности. Тень периодической структуры на искривленной поверхности создает объектное муаровое изображение, искаженное в соответствии с изменением кривизны поверхности. Наблюдение производится со стороны стеклянной пластины в лучах отраженного от поверхности света. Наблюдатель видит муаровый аналог интерференционной картины в области углубления на поверхности тела. Порядок интерференции на муаровом аналоге интерференционной картины вычисляют, отсчитывая номер муаровой полосы, начиная от края. Затем по формулам: $\Delta x = k \cdot d$ или $\Delta x = (2k + 1) \cdot d/2$ вычисляют локальное значение глубины неровности. В случае если углубление на поверхности теплообмена создается путем «выжигания» вблизи пламени, можно, пользуясь методикой, описанной в работах [1, 2], каждой «интерференционной» полосе поставить в соответствие определенную температуру пламени.

Оригинальный метод цифровой фотометрии позволяет рассчитывать температурные и концентрационные поля излучающих прозрачных оптических неоднородностей. Современное программное обеспечение позволяет получить распределение амплитуды све-

товых лучей на плоскости ПЗС-матрицы цифровой фотокамеры. Фотометрическое изображение пламени, представляющее собой картину изолиний интенсивности световых волн и полученное с помощью программы обработки изображений «GIMP 2.2», приведено на рис. 1.

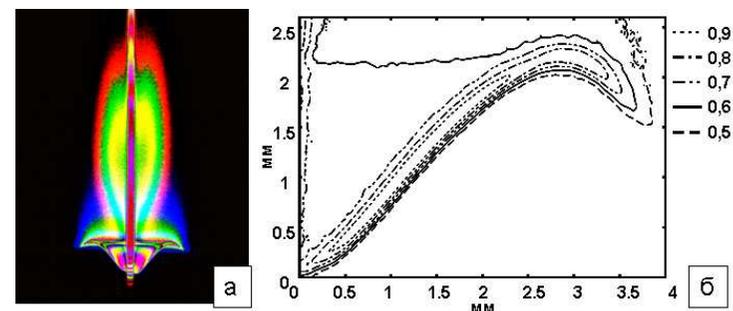


Рис. 1. а) Фотометрическое изображение обращенного пламени; б) температурное поле пламени, полученное методом цифровой фотометрии

Цветные линии на изображении пламени соответствуют тому или иному значению интегральной энергетической светимости пламени. Внешне фотометрическое изображение напоминает интерференционную картину пламени. Аналогия фотометрического изображения с интерференционной картиной не случайна. Результирующее значение энергетической светимости, как и порядок интерференции световых лучей, определяется локальными значениями показателя преломления света и геометрической длины пути луча в оптической неоднородности.

В общем случае порядок линии $\delta(x,y)$ в плоскости изображения связан с локальным значением спектральной плотности энергетической светимости $R_T(x,y,z)$ соотношением:

$$\delta(x, z) = \int_{z_1}^{z_2} [R_T(x, y, z) - R_{0T}] dz .$$

Зная геометрическую форму неоднородности и решив это уравнение одним из известных методов, например методом Шардина, можно получить радиальные распределения спектральной плотности энергетической светимости. Свечение пламени обусловлено

излучением сажевых частиц, которые с большой точностью можно считать абсолютно черным телом и тогда можно использовать закон Стефана-Больцмана, для определения температуры. Измерив температуру в любой точке пламени и сопоставив ей полученное значение светимости, можно получить температуру в любой точке пламени.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований.

Определяющими физическими явлениями, контролирующими устойчивость обращенного пламени и самопроизвольное образование вихревых структур, являются тепловая гравитационная конвекция и срыв пограничного слоя со стабилизатора. Роль тепловой гравитационной конвекции в условиях полуограниченного пространства описана в работе [2]. Для выяснения роли определяющих физических явлений и механизмов самоорганизации вихревых структур в обращенном пламени в условиях модельной цилиндрической камеры сгорания и камере Хилл–Шоу опыты проводили при различной ориентации горелочного устройства относительно вектора ускорения свободного падения. Роль срыва пограничного слоя изучали при изменении расположения и формы стабилизатора относительно вектора скорости потока.

Фотографии обращенных пламен приведены на рис. 2.

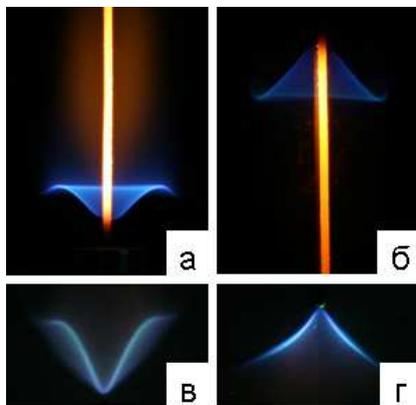


Рис. 2. Фотографии исследуемых объектов:

- а) обращенное пламя на продольном стабилизаторе;
- б) опрокинутое обращенное пламя на продольном стабилизаторе;
- в) обращенное пламя на поперечном стабилизаторе;
- г) опрокинутое обращенное пламя на поперечном стабилизаторе

Границы устойчивости обращенных пламен получали путем обмера по фотографиям геометрических параметров пламени при изменении расхода горючей смеси. Измеренные параметры обращенного пламени позволили построить графики зависимости этих параметров от числа Рейнольдса. Из физических соображений и из размерного анализа определяющих параметров задачи следует, что границы устойчивого горения заранее перемешанной газовой смеси могут быть указаны в координатах чисел Рейнольдса и диффузионного числа Пекле. Результаты расчета области устойчивости обращенного пламени в параллельном потоке представлены на рис. 3, опрокинутого обращенного пламени – на рис. 4.

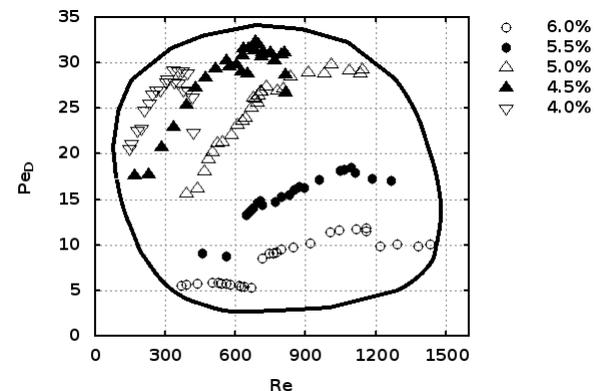


Рис. 3. Область устойчивости обращенного пламени в параллельном потоке

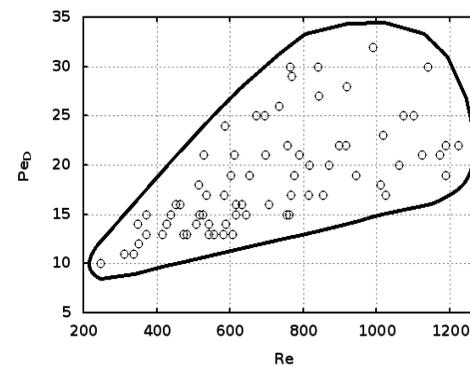


Рис. 4. Область устойчивости опрокинутого обращенного пламени в параллельном потоке

Экспериментальные зависимости $Pe_D(Re)$ получены в широком диапазоне концентраций смеси, диаметров горелок и скоростей газа. Начиная от нижнего, и кончая верхним пределом воспламенения горючей газовой смеси, обращенное в потоке, параллельном поверхности стабилизатора пламя устойчиво в области, ограниченной замкнутой кривой $Pe_D(Re)$.

Из графиков видно, что увеличение концентрации пропана приводит к расширению границ устойчивого горения смеси в обращенном пламени. Каждому составу перемешанной горючей газовой смеси соответствует предельное значение радиуса

Нагревание стабилизатора приводит к тому, что конус пламени до полной стабилизации может самостоятельно дрейфовать вверх от среза горелки при неизменном расходе горючей смеси на расстояние 2–3 диаметра пламени. Скорость дрейфа фронта пламени определяется скоростью нагрева стабилизатора и не превышает нескольких миллиметров в секунду. Теплопередача из зоны горения на стабилизатор и диффузия на внешней границе струи определяют коэрцитивную силу гистерезисной зависимости безразмерного расстояния стабилизации $z_f/z_{f\max}$ от числа Рейнольдса, которая представлена на рис. 5.

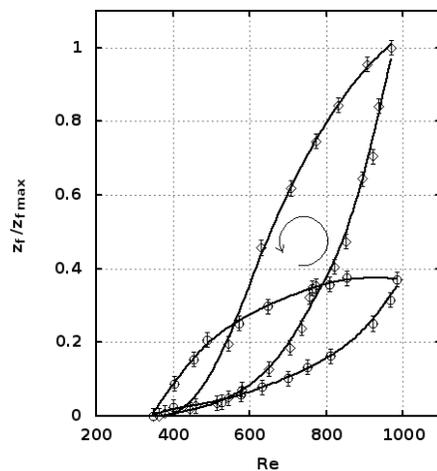


Рис. 5. Гистерезисная зависимость безразмерного расстояния стабилизации от числа Рейнольдса:

- ◇ – статическая зависимость (скорость дрейфа пламени равна нулю);
- – динамическая зависимость (скорость дрейфа отлична от нуля)

Закономерности самопроизвольного формирования стационарных вихревых структур в «опрокинутом» обращенном пламени исследовали в камере Хил-Шоу. Было установлено, что в обращенном пламени до его опрокидывания образование вихревых структур не происходит. Это свидетельствует о ведущей роли тепловой гравитационной конвекции в самоорганизации вихревых структур. Изменение определяющих физических параметров в широком диапазоне показало, что критические условия самопроизвольного образования вихревых структур совпадают с областью устойчивости самого опрокинутого обращенного пламени. Этот результат не противоречит результатам исследований самоорганизации вихревых структур в опрокинутом пламени под горизонтально расположенной поверхностью теплообмена, приведенным в работах [1, 3]. Как и ожидалось, обращение опрокинутого пламени, расширяет границы самопроизвольного образования вихревых структур в связи с перестройкой поля скоростей газа вблизи стабилизатора.

Для выяснения роли гидродинамического растяжения фронта пламени методом цифровой фотометрии было изучено изменение распределения температур в бунзеновском, обращенном и опрокинутом «опрокинутом» пламени. Область максимальной температуры в бунзеновском пламени находится в вершине конуса, а в опрокинутых пламенах происходит смещение зоны максимальной температуры в область основания конуса пламени. За фронтом пламени вблизи поверхности стабилизатора образуется зона пониженной температуры. Градиент температур в касательном направлении относительно фронта пламени свидетельствует о наличии касательной составляющей вектора плотности теплового потока и влиянии «стретч-эффекта».

Характерные распределения температур и вихреобразование при опрокидывании пламени влияют на скорость теплообмена в камере сгорания. Измерение коэффициентов теплоотдачи из зоны пламени к стенкам камеры сгорания производили в трех сравнительных сериях экспериментов. Целью каждой серии экспериментов являлось исследование скорости изменения температуры в калориметре (рис. 6) от времени после инициирования горения.

Из графика видно, что «опрокидывание» пламени приводит к интенсификации процесса теплообмена примерно в 4 раза.

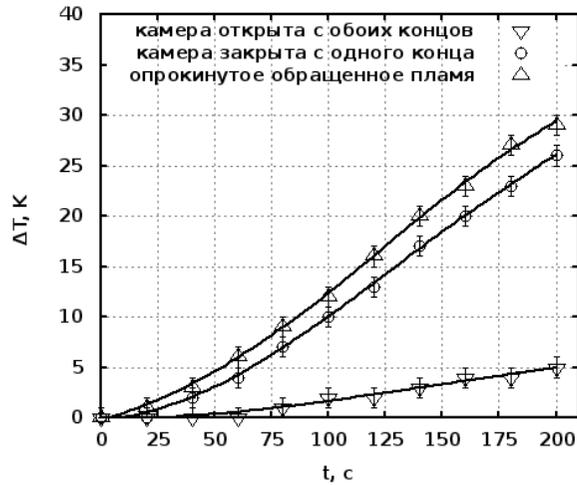


Рис. 6. График зависимости роста температуры в калориметре от времени

В четвертой главе на основании полученных экспериментальных данных обсуждаются физические явления, определяющие горение и теплообмен в обращенном пламени.

Формирование обращенного пламени определяется процессами конвективного переноса, теплопроводности и диффузии, поэтому важно оценить толщину пограничного слоя вблизи бесконечно длинного цилиндра, диаметр которого сравним с шириной теплового слоя впереди фронта пламени. Используя формулы преобразования Манглера и выражение для оценки толщины пограничного слоя из [4], толщину пограничного слоя в круглой струе δ можно описать выражением:

$$\delta = \frac{r_0}{R} \bar{\delta},$$

где $\bar{\delta}$ – толщина плоского пограничного слоя, r_0 – радиус обтекаемого цилиндра, R – радиус пламени. Полученное выражение для толщины пограничного слоя позволяет сделать вывод о решающей роли свободной конвекции при самопроизвольном формировании вихревых структур в пламени при его опрокидывании. Механизм вихреобразования, связанный со срывом пограничного слоя в параллельном потоке, очевидно, не работает.

В п. 4.1 обсуждается влияние дрейфа на продольном стабилизаторе на гистерезис условий стабилизации пламени. Получено выражение для оценки скорости дрейфа:

$$v = \frac{Q \cdot (R + r_0) \cdot l \cdot u_n}{c \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot r_0^2},$$

где Q – удельная теплота сгорания пропановоздушной смеси, u_n – нормальная скорость распространения пламени, R и l – радиус основания и длина образующей конуса пламени, r_0 – радиус стабилизатора, c – удельная теплоемкость стали, ΔT – изменение температуры участка стабилизатора в единицу времени. Подставляя в полученное выражение численные значения входящих в него величин, получим $v \approx 1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}$ м/с, что согласуется с экспериментальными данными. Очевидно, что теплопередача из зоны горения на стабилизатор и диффузия на внешней границе струи определяют коэрцитивную силу гистерезисной зависимости безразмерного расстояния стабилизации $z_f / z_{f \max}$ от числа Рейнольдса, которая представлена на рис. 5 и составляет $(0,1 \div 0,5) \cdot Re$.

В п. 4.2 сравнивается теоретическое и экспериментальное отношение безразмерных коэффициентов теплоотдачи при ламинарном и турбулентном (вихревом) течениях. Теоретическая оценка для условий устойчивого пламени: $\frac{Nu_v}{Nu_l} = \frac{0,0296 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}}{0,33 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3}} \approx 8$, из экспериментальных данных $\frac{Nu_t}{Nu_l} = \frac{(dT/dt)_v}{(dT/dt)_l} \approx \frac{0,16}{0,04} \approx 4$. Теоретические и экспериментальные оценки совпадают по порядку величины.

С целью выяснения роли физических процессов вычислены числа Стантона, St_l и St_v , характеризующие отношение количества теплоты и количества движения, переносимые потоком при ламинарном и вихревом режимах:

$$St_l = \frac{0,33 Re^{0,5} Pr^{1/3}}{Re \cdot Pr} = 0,33 Re^{-1/2} Pr^{-2/3} = 0,013,$$

$$St_v = \frac{0,0296 Re^{0,8} Pr^{0,43}}{Re \cdot Pr} = 0,03 Re^{-1/5} Pr^{-0,57} = 0,01.$$

Из полученных оценок видно, что в вихревом движении удельная доля переноса потока импульса примерно на 20% превышает перенос потока теплоты по сравнению с ламинарным течением. Это, по-видимому, означает, что интенсификация теплообмена достигается за счет увеличения локальной скорости неравномерно нагретых продуктов горения вблизи поверхности камеры сгорания.

В п. 4.3 обсуждается влияние гидродинамического растяжения пламени на его структуру, оценку которого проводили по результатам расчетов распределений температуры. Градиенты температур в окрестности максимума температуры определяют скорость теплоотдачи с участка поверхности фронта пламени. В связи с этим, параметр Карловица вычисляли, как отношение градиентов температур в направлении нормали и касательной к поверхности фронта пламени в данной точке. Результаты вычислений сопоставляли с условиями на границе области устойчивости обращенного пламени. Обнаружено, что если в любой точке границы устойчивости параметр Карловица больше 12, то фронт пламени срывается со стабилизатора и гасится.

Приводятся оценки возможных изменений температуры и концентрации на элементе фронта при обращении или опрокидывании пламени. Из полученных выражений видно, что угол наклона данного участка поверхности фронта пламени относительно вектора скорости горючей газовой смеси определяет изменение температуры и концентрации на нем. Это подтверждается результатами экспериментов, полученных в данной работе.

В приложениях приведены листинги программ для расчета и визуализации температурных полей методом цифровой фотометрии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика комплексного изучения гидродинамических и теплофизических явлений, происходящих при обращении и опрокидывании газоздушного пламени и экспериментальные установки для проведения исследований.

2. Разработан и апробирован оригинальный метод цифровой фотометрии для визуализации течений в пламени.

3. Разработан и опробован метод муаров для исследования глубины выгорания поверхности теплообмена. Показано, что он может быть использован при экспериментальном исследовании процессов теплообмена между пламенем и стенкой камеры сгорания.

4. Предложен оригинальный метод стабилизации обращенного пламени на стабилизаторе, расположенном параллельно потоку газа.

5. Получены области устойчивого горения газоздушного пламени при стабилизации в параллельном потоке при изменении безразмерных критериев Рейнольдса и Пекле (при $Re = 600$: $Pe_D = 11 \div 26$ для обращенного пламени и $Pe_D = 2 \div 35$ для опрокинутого обращенного пламени).

6. Обнаружен гистерезис устойчивого горения обращенного пламени по числу Рейнольдса. Дано объяснение физического механизма, управляющего коэрцитивной силой гистерезисной зависимости, составляющей $(0,1 \div 0,5) \cdot Re$.

7. Проведены расчеты температурных полей для бунзеновского и обращенных пламен. Обнаружено влияние стретч-эффекта на расположение максимума температуры. Расчетами параметра Карловица показано, что неравномерность распределения температуры на поверхности пламени может являться причиной развития неустойчивости пламени.

8. Обнаружено явление самопроизвольного формирования вихревых структур при «опрокидывании» обращенного пламени.

9. Исследовано влияние самопроизвольных вихревых структур на интенсивность теплообмена. Показано, что коэффициент теплоотдачи при «опрокидывании» обращенного пламени возрастает в несколько раз ($Nu_v/Nu_l \approx 4$). Дано физическое объяснение полученного эффекта.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Алексеев М.М. Вихревые структуры в плоском, опрокинутом «обращенном» пламени / М.М. Алексеев, В.П. Самсонов // Сб. аннотации докладов IX-го Всероссийского съезда по теоретической и прикладной механике, Том II: – Нижний Новгород, Россия, 2006. – С. 11.

2. Alexeev M.M. Method of digital Photometry for Visualization and Calculation of physical Parameters Distributions in transparent radiating Flows / M.M. Alexeev, E.Yu. Murunov, V.P. Samsonov // 13rd Int. Conference on Meth. Aerophys. Research: – Novosibirsk, 2007. – P. 5–12.

3. Alexeev M.M. Experimental Investigation of Influence of “Stretch-Effect” on Flame Front Structure / M.M. Alexeev, E.Yu. Murunov, V.P. Samsonov // IX Int. Sympos. on Self-propagating High-temperature Synthesis: – Dijon, France, 2007. – P. 5.

4. Алексеев М.М. Метод цифровой фотометрии в исследовании структуры вихревого пламени / М.М. Алексеев, В.П. Самсонов // Письма в Журнал технической физики. – 2007. – Т. 33, вып. 11. – С. 34–40.

5. Алексеев М.М. Способ измерения глубины неровностей на поверхностях твердых тел / М.М. Алексеев, В.П. Самсонов // Патент на изобретение 564278 МПК F24C 9/00 Сург. гос. ун-т. – 2006136940/28; Заявл. 18.10.2006; Оpubл. 23.05.2008; Бюл. № 11.

6. Алексеев М.М. Формирование обращенного пламени на тонком бесконечном стабилизаторе // В материалах Международной конференции «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии»: Томск, Россия, 2007. – С. 12.

7. Алексеев М.М. Дрейф фронта обращенного пламени на бесконечном тонком стабилизаторе / М.М. Алексеев, А.И. Медведев, А.Г. Мустяца // Наука и инновация XXI века: материалы VIII Окружной конференции молодых ученых.– Сургут: Изд-во Сур. ун-та, 2008. – Т. 1. – С. 9–10.

8. Алексеев М.М. Новые методы экспериментальных исследований гидродинамики и тепло-массообмена в химически реагирующей среде / М.М. Алексеев, В.П. Самсонов. – Сургут: Изд-во Сур. ун-та, 2008. – 141 с.

9. Алексеев М.М. Стабилизация обращенного пропановоздушного пламени на струне, натянутой вдоль потока / М.М. Алексеев, В.П. Самсонов // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 3–11.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самсонов В.П. Исследование структуры пламени в пограничном слое методом осаждения сажи на поверхность / В.П. Самсонов // Химическая физика. – 1992. – Т. 11, № 11. – С. 1580–1587.

2. Самсонов В.П. Самопроизвольные вихревые структуры в пламени / В.П. Самсонов. – Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2003. – 124 с.

3. Алексеев М.В. Закономерности спонтанного образования вихревого диффузионного пламени / М.В. Алексеев, И.Г. Фатеев, В.П. Самсонов // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25, № 6. – С. 47–50.

4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

Алексеев Максим Михайлович

**ГИДРОДИНАМИКА И СТРУКТУРА
ОБРАЩЕННОГО ОПРОКИНУТОГО ПЛАМЕНИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 12.05.09. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,05.

Печать трафаретная. Тираж 100. Заказ № П-47.

Отпечатано полиграфическим отделом

Издательского центра СурГУ.

г. Сургут, ул. Лермонтова, 5. Тел. 32-33-06.

ГОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры»

628400, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ,

г. Сургут, пр. Ленина, 1.

Тел. (3462) 76-29-00, факс (3462) 76-29-29.