На правах рукописи

Мурунов Евгений Юрьевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАМЕНИ НА АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЕ ГОРЕНИЕ

Специальность: 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 автоматики и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Сургутский государственный университет ХМАО – Югры».

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор — **Самсонов Виктор Петрович**

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук, профессор — **Архипов Владимир Афанасьевич**

доктор физико-математических наук, доцент — **Ларионов Виктор Михайлович**

Ведущая организация: — **Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск)**

Защита состоится 19 июня 2009 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050 г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 239 НИИПММ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «_____» мая 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук — Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Возбуждение акустических колебаний в пламени является одним из факторов, сопровождающих развитие неустойчивости горения, как для газовых, так и для жидких систем. Акустические колебания в пламени являются типичным примером тепловых автоколебаний, возникающих в системе с тепловым источником и резонатором, в котором возможно осуществление обратной связи между колебаниями давления, колебаниями скорости теплоотдачи и периодическим изменением скорости химической реакции.

Известно большое количество работ по исследованию «поющего» пламени, формирующегося при горении газов. Традиционной проблемой эксперимента является то, что подводящий топливный тракт является причиной возбуждения дополнительных гармоник в результирующем колебании, что маскирует определяющие физико-химические явления. Влияние колебаний давления на срезе горелки может быть сведено к минимуму или полностью устранено при формировании обращенного на стабилизаторе «поющего» пламени.

При возбуждении акустических колебаний, возникающих при горении жидкого топлива, проблема изменения скорости подвода топлива в камеру сгорания не возникает вообще. Это позволяет получить количественные данные о влиянии автоколебаний горения на изменение полноты сгорания и тепловой мощности горелочного устройства. Однако сведения о закономерностях формирования «поющего» обращенного пламени и «поющего» пламени, образующегося при горении жидкого топлива, в научной литературе в настоящее время отсутствуют.

Изучение обращенного поющего пламени представляет самостоятельный фундаментальный интерес в связи с характерным профилем скоростей, формирующимся вблизи тела обтекания – стабилизатора. Наличие пограничного слоя на твердой поверхности стабилизатора приводит к перегибу профиля скоростей, что является причиной отрыва пограничного слоя и создания вихревых возмущений.

Вопрос о физическом механизме, реализующем обратную связь между колебаниями давления и тепловой мощности пламени, остается до сих пор открытым. Метод Фурье-анализа колебаний поющего пламени остается мало востребованным. Как следствие

этого, роль процессов переноса, вихреобразования и резонансных свойств камеры сгорания до конца не изучена.

Прикладное значение обращенного поющего пламени обусловлено увеличением интенсивности теплоотдачи в стенки камеры сгорания.

Цель диссертационной работы состоит в изучении закономерностей возбуждения обращенного поющего пламени и поющего пламени, образуемого при горении жидкого топлива; создании комплексной методики экспериментального исследования структуры поющего пламени; экспериментальной проверке выводов ряда теоретических положений, объясняющих физические механизмы, управляющие явлениями вихреобразования и возбуждения акустических колебаний в трубе-резонаторе; нахождении новых, научно обоснованных технологических решений, использующих влияние акустических колебаний и явление гистерезиса на горение и теплообмен для разработки экономичных камер сгорания.

Научная новизна. В диссертационной работе впервые:

1. Экспериментально найдены условия возбуждения акустических колебаний в виде интервала значений тепловой мощности пламени, образуемого при диффузионном горении бензина. Показано, что возбуждение акустических колебаний сопровождается уменьшением массовой скорости горения, увеличением полноты сгорания в $2 \div 3$ раза. Обнаружено, что интервал значений тепловой мощности пламени, при которой возбуждаются акустические колебания, расширяется в 2 раза при замене химически нейтрального источника тепла (труба Рийке).

2. Обнаружены особенности возбуждения поющего пламени, как при горении жидкого топлива, так и при горении заранее перемешанных горючих газовых систем, проявляющиеся в существовании гистерезисных явлений. Экспериментально найдены гистерезисные зависимости амплитуды колебаний от числа Рейнольдса, определяющие условия возбуждения обращенного поющего пламени. Обращение поющего пламени является причиной увеличения коэрцитивной силы гистерезиса в $1{,}2 \div 1{,}4$ раза.

3. Обнаружено изменение скорости теплоотдачи из пламени на поверхность трубы-резонатора при переходе от стационарного режима горения к автоколебательному. Установлено, что тепловой поток из зоны пламени к стенкам трубы-резонатора увеличивается на 20–30%.

4. Обнаружено явление смены основной моды колебаний на вторую гармонику в обращенном поющем пламени при увеличении расхода горючей газовой смеси.

5. Предложены физические механизмы возбуждения поющего пламени для изученных гидродинамических ситуаций. Показано, что возбуждение автоколебаний происходит под влиянием характерного профиля скорости газа с перегибом, формирующимся вблизи фронта пламени, а также связано с периодическим отрывом пограничного слоя на стабилизаторе. Это является причиной расширения интервала возбуждения автоколебаний пламени при изменении тепловой мощности.

6. Предложено новое технологическое решение, реализующее способ утилизации отходов горюче-смазочных материалов в резонаторной печи при формировании поющего пламени.

На защиту выносятся:

1. Экспериментальные результаты, подтверждающие: а) влияние профиля скорости газа на границы возбуждения поющего пламени; б) влияние вихревого и колебательного движения газа в камере сгорания на скорость горения и полноту сгорания газового и жидкого топлива; в) экспериментальные результаты, согласно которым автоколебания пламени сопровождаются изменением интенсивности теплопередачи на поверхность теплообмена; г) экспериментальные результаты, согласно которым обращение пламени на стабилизаторе позволяет изменять ведущую моду колебаний при изменении скорости горючей газовой смеси.

2. Комплексная методика экспериментального исследования нестационарного пламени, включающая в себя автоматизированный сбор данных для одновременного снятия показаний приборов и датчиков и их математической обработки с помощью пакетов стандартных программ.

3. Экспериментальное и теоретическое обоснование предлагаемого физического механизма поддержания автоколебаний пламени, согласно которому: 1) при горении жидкого летучего топлива колебания давления приводят к периодическому изменению диаметра пламени, что приводит к изменению температуры и скорости подъема продуктов горения и, соответственно, интенсивности процессов переноса; 2) колебания давления в обращенном пламени являются причиной изменения угла раскрытия обращенного пламени и изменения скорости гидродинамического растяжения фронта пламени, приводящего к изменению местоположения и величины максимального значения температуры. Результирующее переменное тепловыделение приводит к согласованным по фазе колебаниям давления; 3) колебания расхода газа в бунзеновском пламени определяют согласованные по фазе колебания давления и скорости тепловыделения; 4) смена ведущей моды колебаний обусловлена изменением частоты срыва вихрей в пограничном слое стабилизатора;

4. Техническое решение, позволяющее использовать эффект поющего пламени для повышения КПД горелочного устройства.

Обоснованность и достоверность полученных в диссертации экспериментальных результатов обусловлена хорошей повторяемостью всех явлений и эффектов в опытах, многократно производившихся при различных характерных размерах горелочных устройств, длин и диаметров трубы-резонатора. Сравнение между собой всех полученных разными методами экспериментальных результатов дает хорошее качественное соответствие. Полученные результаты согласуются с данными других авторов, опубликованными в научной литературе.

Практическая ценность и внедрение результатов диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Обнаруженные закономерности возбуждения автоколебаний в обращенном пламени дополняют представления о возможных различных физических механизмах обратной связи между колебаниями давления и скорости горения при малых числах Рейнольдса, влиянии акустических колебаний в камере сгорания на неустойчивость горения, скорость и полноту сгорания топлива и величину теплового потока из зоны горения. Обнаруженные закономерности возбуждения поющего пламени могут быть использованы для оценки режимов устойчивого горения в камерах сгорания топок и двигателей, а также для повышения экономичности камер сгорания.

2. Диссертационная работа выполнялась на кафедре экспериментальной физики Сургутского государственного университета (2005–2008 гг.). Предложенные физические механизмы образования тепловых автоколебаний применялись в экспериментальных исследованиях неустойчивого горения в камерах сгорания, выполнявшихся по госбюджетной тематике кафедры экспериментальной физики СурГУ, зарегистрированной во ВНТИЦ за № 0120.0 802766. Выполнение работы поддержано грантами и 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 13-ой Международной конференции по звуку и вибрациям (Вена, Австрия, 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.), 21-ом Международном Коллоквиуме по динамике взрыва и реагирующих систем (Пуатье-Футуроскоп, Франция, 2007 г.), 8 и 9-ой научных конференциях «Наука и инновации 21 века» (Сургут, 2007, 2008 гг.).

Количество основных работ по диссертации – 9.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 97 наименований. Общий объём составляет 136 страниц, включая 44 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации проводится анализ научных работ, посвященных изучению физических явлений, сопровождающих возбуждение автоколебаний горения при наличии резонатора-камеры сгорания. Особое внимание уделялось ведущей роли спонтанных вихревых структур, образующихся в характерных гидродинамических условиях при генерации пламенем акустических колебаний (В.В. Афанасьев, Н.И. Кидин), а также физическим механизмам осуществления обратной связи между колебаниями давления и скорости горения (В.М. Ларионов). В научной литературе имеются работы, посвященные возбуждению автоколебаний лишь в газовоздушных пламенах, стабилизированных на срезе горелки. Способы получения поющего пламени, в механизме обратной связи которого, отсутствует звено с колебаниями расхода газа, мало изучены.

В настоящее время отсутствуют сведения о явлении смены одной ведущей моды автоколебаний горения на другую. Практически не известны результаты, свидетельствующие о влиянии акустических колебаний на полноту и скорость сгорания топлива. Остается актуальной проблема интенсификации процессов переноса и теплообмена в резонансных камерах сгорания.

Исходя из недостаточной изученности и важности проблемы, сформулирована цель работы и составлена программа исследований.

Во второй главе описаны объекты исследования, экспериментальные установки, системы и методы контроля, визуализации и измерения параметров поющего пламени.

В качестве объектов исследования выбраны пламя бунзеновской горелки, обращенное кинетическое пламя пропана и диффузионное пламя бензиновой горелки.

Выбор объектов обусловлен несколькими причинами. Первая из них связана с тем, что использование летучего жидкого топлива позволяет исключить обратную связь между пульсациями давления и расходом горючего. Кроме того, применение фитиля в качестве горелки позволяет исключить влияние топливоподводящего тракта на резонансную частоту камеры сгорания и появление дополнительных гармоник в спектре колебаний. Вторая причина заключается в том, что профиль скорости продуктов горения над твердой поверхностью фитиля, определяющий условия формирования вихревых ячеек и скорость вращения газа в них, значительно отличается от пуазейлевского над срезом газовой горелки. Это создает другие граничные условия для формирования распределения скоростей газа в потоке с изгибом профиля, необходимым для вихреобразования. В качестве основного объекта выбрано также обращенное пламя, в котором стабилизатор располагается либо поперек, либо вдоль оси струи.

Основным элементом экспериментальной установки являлась вертикально расположенная, открытая с обоих концов стеклянная труба, одновременно являющаяся акустическим резонатором. Прозрачные стенки трубы позволяли визуализировать пламя. В нижнюю четверть трубы-резонатора помещали каждый из исследуемых объектов. В ходе экспериментов изменяли диаметры горелок от 4 до 8 мм, внутренний диаметр трубы-резонатора изменяли от 37 до 100 мм, длину трубы-резонатора изменяли от 0,46 м до 2,3 м. Пропановоздушные смеси готовили в газометре вытеснения. Обращение газовоздушного пламени производили на кольцевом стабилизаторе. Объемный расход газа измеряли расходомерами-счетчиками РГС-1 и РГС-2 с точностью до 10^{-10} м^3/с. Среднюю скорость газа на срезе горелки рассчитывали по объемному расходу газа. Температуру стабилизатора, фронта пламени вблизи стабилизатора и стенок трубы-резонатора измеряли термопарой K1-MY, пирометром Raytek

MX6 и тепловизором Thermovision®550. Свечение пламени фотографировали цифровым фотоаппаратом Canon EOS 20D.

Возбуждение пламени при горении бензина осуществляли на горелке, представляющей собой алюминиевый тонкостенный цилиндрический стакан. Внутрь стакана заливали бензин и вставляли фитиль, изготовленный из пористого абразивного камня. Изменение тепловой мощности горелки осуществляли путем изменения площади поверхности абразива, выступающей из стакана части фитиля. Массовую скорость горения и тепловую мощность горелки определяли по изменению массы горелки за фиксированные промежутки времени. Измерения массы проводили на электронных весах с относительной погрешностью менее 0,02. Частоту и амплитуду акустических колебаний измеряли микрофоном. Для определения ведущих мод акустических колебаний использовали метод Фурье-анализа. Сигнал с микрофона, расположенного у основания трубы-резонатора, подавался на микшерный пульт для усиления, после чего поступал на модуль АЦП, используемый для обработки цифрового сигнала и выводился на экран монитора.

Расчет пространственного распределения температуры в пламени производили методом цифровой фотометрии. Эксперименты с поющим пламенем сопоставляли с экспериментами на трубе Рийке.

Измеряемыми в эксперименте физическими параметрами являлись: максимальные температура, высота пламени в различные фазы колебания, границы области возбуждения акустических колебаний в координатах амплитуды акустических колебаний и подводимой в резонатор тепловой мощности пламени и массовая скорость горения. Изменение указанных параметров соотносили с результатами измерения ведущих мод колебаний. Для их измерения и регистрации использовали совмещение функциональных возможностей персонального компьютера с его программным обеспечением и датчиков контроля.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследования закономерностей возбуждения поющего пламени при горении жидких и газовых систем.

В предположении, что источником возмущений скорости горения, порождающих автоколебания с резонансной частотой камеры сгорания, являются низкочастотные колебания диффузионного пламени в открытой атмосфере, были проведены опыты по исследованию закономерностей развития низкочастотных колебаний пламени

бензиновой горелки в открытой атмосфере. Было обнаружено, что при сближении горелок на расстояние, сравнимое с максимальным диаметром пламени, происходит смыкание пограничных слоев на границе струй восходящих продуктов горения и образование в конвективной колонке профиля скорости с перегибом. Это приводит к возникновению колебаний каждого пламени как целого. Полученные осциллограммы показывают, что частоты колебаний совпадают, а фазы колебаний смещены только на начальном этапе развития колебательного процесса.

На рис. 1 приведены результаты исследования изменения массовой скорости горения в случаях, когда горелку помещали в открытой атмосфере или в трубе-резонаторе до и после возбуждения акустических колебаний. Графики показывают, что массовая скорость горения линейно зависит от высоты фитиля. Развитие акустических колебаний сопровождается уменьшением высоты пламени и скорости горения, полнота сгорания топлива при этом увеличивается.

Обнаружено, что при тепловой мощности, соответствующей границе возбуждения акустических колебаний, высота пламени и массовая скорость горения уменьшаются скачкообразно. Одновременно увеличивается температура пламени и полнота сгорания бензина. Особенно сильно это проявляется при увеличении тепловой мощности пламени. При мощности, равной 350 Вт, высота поющего пламени уменьшается в 2 раза.

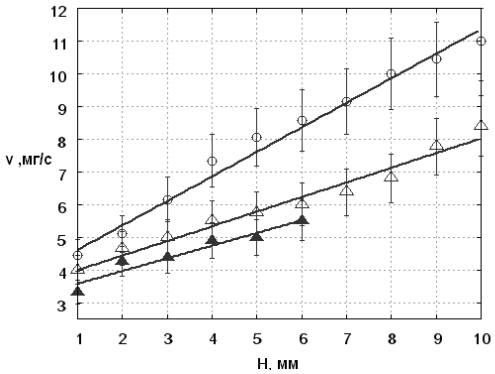


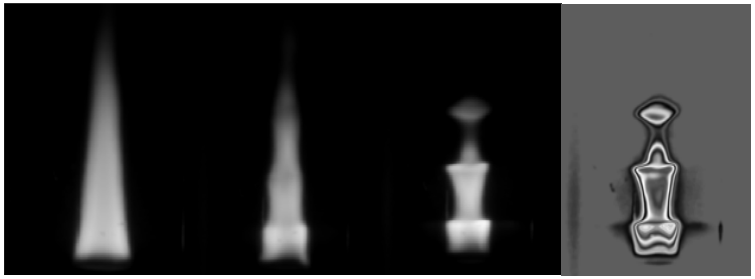
Рис. 1. Зависимость массовой скорости горения от высоты фитиля: ○ – открытое пламя; Δ – невозбужденное пламя в трубе-резонаторе; ▲ – поющее пламя; v – массовая скорость горения; H – высота фитиля бензиновой горелки

Найденные зависимости амплитуды колебаний пламени от тепловой мощности имеют гистерезисный характер. Явление гистерезиса обусловлено формированием вихревых структур вблизи пламени и вниз по течению.

На рис. 2 а, б, в приведены изображения светящихся стационарного и «поющего» пламени бензиновой горелки. Видно, что возбуждение колебаний столба газа в трубе-резонаторе приводит к волнообразованию на поверхности пламени.

Фотографии свечения пламени позволяют вычислить диаметр вихревой ячейки как величину, равную расстоянию между двумя соседними гребнями волн на поверхности пламени: $x_0 \approx 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ м. Смещение вихревых ячеек происходит со скоростью, существенно меньшей скорости поступательного движения продуктов горения.

Для анализа механизмов обратной связи при возбуждении поющего пламени при горении конденсированного топлива проводили Фурье-анализ колебаний. В качестве эталонного спектра, определяющего наиболее значимые моды колебаний в трубе резонаторе, использовали спектрограммы колебаний химически нейтрального столба воздуха в трубе Рийке.



а б в г

Рис. 2 а, б, в, г. Изображения свечения пламен бензиновой горелки:
а – пламя до возбуждения акустических колебаний;
б, в – «поющее» пламя; г – фотометрическое изображение

Пример спектрограммы, полученной для диффузионного пламени бензина, представлен на рис. 3. Сравнение спектрограмм показывает, что возбуждение колебаний в диффузионном пламени происходит в строгом соответствии с первыми двумя ведущими гармониками. Высшие гармоники в диффузионном пламени подавляются. Объяснением этого факта является то, что колебания скорости диффузионного переноса происходят в противофазе с колебаниями давления в трубе-резонаторе. Это явление приводит к лучшему перемешиванию реагирующих компонент и увеличению полноты сгорания.

Изменение температурного поля диффузионного «поющего» пламени бензиновой горелки в течение одного периода колебаний исследовали методом фотометрии. Обнаружено, что наибольший градиент температуры создается вблизи среза горелки. При возбуждении акустических колебаний увеличивается также максимальное значение температуры в пламени.

Массовая скорость горения при этом уменьшается, а полнота сгорания увеличивается примерно на 20%. Это можно объяснить особенностями тепло-массопереноса вблизи поверхности испарения бензина, обусловленными движением газа в вихревой структуре. Кроме того, вихревое течение увеличивает время пребывания частицы топлива в зоне горения.

Увеличение тепловой мощности горелки приводило к увеличению амплитуды колебаний столба газа внутри трубы резонатора, что приводило к срыву и гашению пламени.

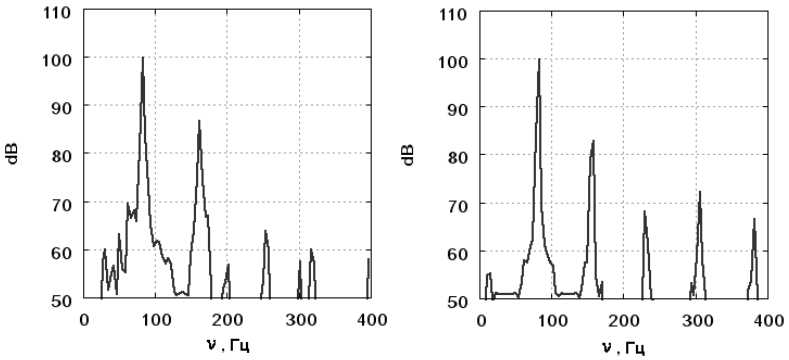


Рис. 3. Результаты Фурье-анализа спектра колебаний:
а – поющего пламени на бензиновой горелке; б – труба Рийке

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что возбуждение акустических колебаний происходит в случае, если характерные времена диффузии, индукции вихревой структуры и периода колебаний столба газа примерно равны. Развитие акустических колебаний сопровождается уменьшением высоты пламени и скорости горения, при этом максимальная температура пламени и полнота

сгорания топлива увеличиваются. Основную роль в изменении температурного поля пламени играет развитие вихревых структур вблизи пламени.

Формирование обращенного пламени при горении заранее перемешанной горючей газовой смеси изучали в широком интервале скоростей газа, диаметров горелки и концентрации пропана. Область существования устойчивого обращенного пламени в попутном потоке получена в координатах безразмерной высоты пламени и диффузионного числа Пекле.

Гашение пламени происходит при горении газовых смесей, как с избытком, так и с недостатком кислорода. Решающим фактором погасания пламени является отношение амплитуды к периоду колебаний пламени. В случае, если оно превышает нормальную скорость распространения пламени происходит его погасание. Фурье-анализ позволил выделить ведущие моды колебаний. Ярко выражены две ведущие моды колебаний с частотами 100 и 1000 Гц и две второстепенные моды с частотами 400 и 500 Гц. Низкочастотная ведущая мода может быть связана с гидродинамическим растяжением фронта пламени.

Действительно, определяя характерное время растяжения и разрыва фронта пламени t_s как отношение длины пламени L_f к касательной скорости газа v_τ, получим:

$$t_s = \frac{L_f}{v_\tau} = \frac{L_f}{v \cdot cos\alpha} \cong 1 \cdot 10^{-2}\ c \cdot$$

Частота обратно пропорциональна этому времени и равна f_s = 100 Гц. Высокочастотная ведущая мода обусловлена собственной частотой трубы, внутри которой происходило горение. Собственная частота равна отношению скорости звука c к удвоенной длине трубы L_t. Принимая во внимание, что при средней температуре продуктов горения в трубе, равной 480 К, скорость звука примерно равна 440 м/с, получим:

$$f_l = \frac{c}{2L_t} = \frac{440\ м/с}{44 \cdot 10^{-2}\ м} \cong 1000\ Гц \cdot$$

Две другие моды колебаний с частотами f_c и f_h определяются характерным временем химической реакции t_c и характерным гидродинамическим временем t_h. Частоту f_c можно оценить из соотношения:

$$f_c = \frac{k}{\delta_f^2} \cong \frac{4 \cdot 10^{-4}\ м^2/с}{1 \cdot 10^{-6}\ м^2} \cong 400\ Гц,$$

где δ_f – ширина теплового слоя фронта пламени. Оценивая характерное гидродинамическое время, как отношение ширины теплового слоя фронта пламени к нормальной скорости распространения пламени, получим:

$$f_h = \frac{v_n}{\delta_f} \cong \frac{0.5\ м/с}{1 \cdot 10^{-3}\ м} \cong 500\ Гц \cdot$$

Данные оценки характерных частот хорошо согласуются с полученными экспериментальными результатами.

Влияние обращения пламени на кольцевом стабилизаторе в трубе-резонаторе исследовали путем сравнительного анализа спектрограмм колебаний обращенного и бунзеновского пламени.

Характерно, что основные моды колебаний сохраняются (90 Гц и 175 Гц). Все основные процессы, связанные с теплопереносом в вихревых структурах, происходят с частотами основных гармоник трубы-резонатора. Это является причиной их слияния. Низкочастотная ведущая мода (90 Гц) является основной модой трубы-резонатора. Дополнительные моды колебаний с незначительной амплитудой, очевидно обусловлены вихреобразованием, связанным с временем формирования и отрыва пограничного слоя: $t_\delta \approx 0{,}35 \cdot r_0/U \approx 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}$ с.

При использовании кольцевого стабилизатора, расположенного в плоскости поперечного сечения трубы-резонатора, происходят бифуркации фронта пламени при его перескоке с устья горелки на стабилизатор. Примеры перескока пламени показаны на рис. 4.

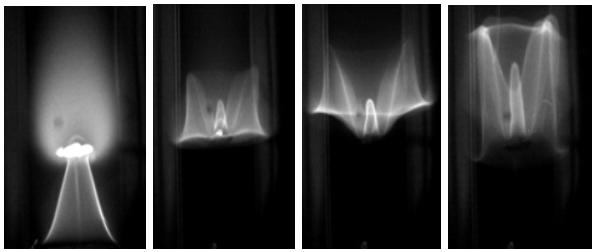


Рис. 4. Фотографии свечения пламени при переходе от стационарного режима горения к автоколебательному

Обнаружены два типа гистерезисных явлений, сопровождающих возбуждение автоколебаний. На рис. 5а показан гистерезис зависимости амплитуды колебаний от числа Рейнольдса при длине трубы L = 2,3 м. Гистерезис проявляется в задержке перескока пламени со стабилизатора на срез горелки при уменьшении расхода горючей газовой смеси. Верхняя часть полупетли гистерезиса соответствует прямому направлению обхода, нижняя – обратному. Необычность обнаруженного явления заключается в том, что при уменьшении скорости подвода горючей газовой смеси происходит не просто задержка в уменьшении амплитуды колебаний, а ее уменьшение по сравнению с первоначальным значением («перехлестнутая» петля гистерезиса). Скорость расхода горючей газовой смеси, при которой фронт пламени возвращается на срез горелки, уменьшается примерно на 30%. Особенностью гистерезисной зависимости является существование критического числа Re, при котором происходит изменение знака коэрцитивной силы.

При возбуждении автоколебаний в трубе длиной L = 1,2 м, наблюдается гистерезис зависимости амплитуды колебаний от числа Рейнольдса, представленный на рис. 5б.

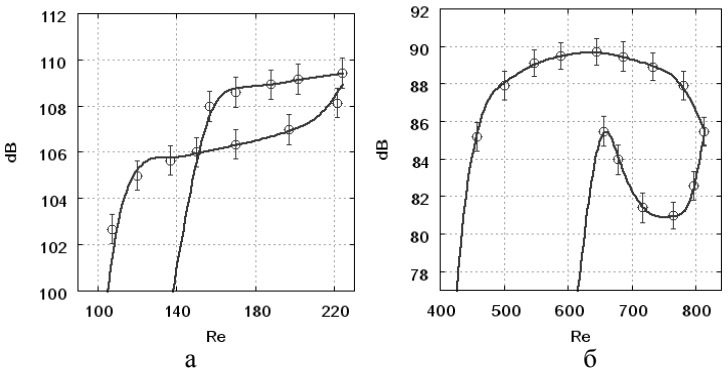


Рис. 5. Гистерезис условий перескока обращенного пламени на кольцевом стабилизаторе: а – L = 2,3 м; б – L = 1,2 м

Нижняя часть петли гистерезиса соответствует прямому обходу, верхняя – обратному. Особенностью этой гистерезисной зависимости является увеличение амплитуды колебаний столба газа в трубе-резонаторе при уменьшении скорости подвода горючей газовой смеси, по сравнению с начальной амплитудой колебаний, возбуждаемых обращенным пламенем. Другой отличительной особенностью этой гистерезисной зависимости является смена ведущей моды колебаний с изменением скорости подвода горючего. Указанные явления перестройки ведущих мод автоколебаний и увеличение амплитуды колебаний при уменьшении скорости подвода горючей газовой смеси, проявляются при удалении стабилизатора от среза горелки на расстояние, большее, чем диаметр горелки.

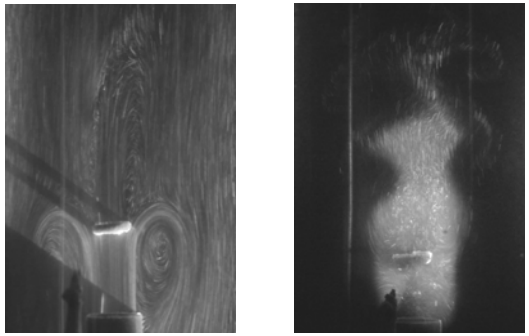
В четвертой главе на основании полученных экспериментальных данных дается описание и обоснование роли вихревых структур в управляющих механизмах возбуждения автоколебаний и процессов тепло-массообмена.

Предлагаемый механизм влияния вихревых структур на возбуждение автоколебаний основан на нескольких предположениях. Первое из них – о влиянии специфических профилей скоростей горючей газовой смеси и продуктов горения в выбранных объектах на область возбуждения автоколебаний. Второе связано с влиянием самопроизвольной закрутки продуктов горения на интенсивность теплообмена. Скорость теплообмена является основным элементом в гидродинамическом механизме обратной связи между колебаниями давления и скорости горения. Третье предположение связано с влиянием гистерезисных явлений на обмен энергией между пламенем и резонатором.

Экспериментальные результаты, описанные в главе 3, показывают, что для каждого из выбранных объектов существует свое минимальное критическое значение подводимой из пламени тепловой мощности в колебательную систему, при которой возбуждаются автоколебания. Вращательное движение газа в тороидальной вихревой ячейке является колебательным в продольном и радиальном направлениях. При удалении вихревой ячейки от пламени на расстояние нескольких диаметров трубы-резонатора вращательное движение затухает и переходит в поступательное. Размеры вихревых ячеек совпадают с расстоянием между гребнями на поверхности пламени (см. рис. 2).

Из сказанного следует, что можно определить характерные размеры области в трубе-резонаторе, где происходит усиление интенсивности процессов переноса тепла и массы за счет вращательного движения газа. Область трубы-резонатора, в которой столб нагретых продуктов горения совершает поступательное колебательное движение, занимает верхние три четверти длины. Поступательное

движение определяет интенсивность теплообмена продуктов горения со стенками камеры сгорания. Возмущение скорости потока в виде симметричных вихрей представленных на рис. 6, является одной из причин мягкого возбуждения акустических колебаний в трубе резонаторе.



а б

Рис. 6. Поле скоростей у среза газовой горелки в трубе-резонаторе:
а – до воспламенения горючей газовой смеси;
б – после воспламенения горючей газовой смеси,
при развитых автоколебаниях

Размеры пламени сравнимы или превышают размеры вихревых ячеек. Это объясняет ведущую роль конвективного механизма переноса тепла и массы в контроле скорости горения и развитии автоколебаний. В диффузионном пламени масштаб вихревой ячейки, втрое меньший высоты пламени, является причиной увеличения поверхности пламени. Увеличение площади поверхности пламени приводит к увеличению абсолютных значений теплового потока и потока массы. На картах изотерм это проявляется в увеличении средней температуры пламени.

Размеры камеры сгорания и горелочных устройств определяют характерные масштабы гидродинамических времен: периода колебания столба газа в трубе-резонаторе и периода вращения газа в вихревой ячейке. Это проявляется в изменении числа и амплитуды гармоник колебаний, возбуждаемых при автоколебательном горении.

Полученные закономерности автоколебательного горения жидкого топлива позволяют сделать предположения относительно физического механизма, осуществляющего обратную связь между колебаниями давления в трубе-резонаторе и скоростью горения. Очевидно,

что изменение высоты поющего пламени и его температуры связано с формированием вихревых структур в трубе-резонаторе. Появление локальных максимумов температуры в поющем пламени обусловлено дополнительным притоком кислорода воздуха за счет вихревого движения вблизи границы пламени, полнотой сгорания топлива и увеличением скорости химической реакции. Периодическое изменение локальной температуры приводит к изменению удельного объема, что и приводит к развитию колебаний давления.

Формирование вихревой структуры в поющем пламени связано с периодическим ускорением, которые претерпевает поступательное движение столба газа в трубе-резонаторе и ускорением потока в пламени при тепловом расширении и под влиянием тепловой гравитационной конвекции. Периодическое изменение скорости горения и тепловыделения усиливает периодические ускорения потока, зависящие не только от граничных условий, создаваемых стенками камеры сгорания. В большей мере они определяются механизмами обратной связи между скоростью тепловыделения, колебаниями давления в камере сгорания.

В данной работе определение областей возбуждения поющего пламени для различных объектов исследования и проведение Фурье-анализа колебаний для каждого из них доказывают ведущую роль процессов переноса массы и тепла в вихревой структуре. Это утверждение доказывается увеличением интенсивности теплообмена в камере сгорания в целом.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

1. Разработана комплексная методика экспериментального исследования. Создана экспериментальная установка для исследования влияния самопроизвольного образования вихревых структур, формирующихся в пламени при различных условиях на автоколебательное горение.

2. В рамках применяемых методов экспериментальных исследований установлено, что основными физическими явлениями, приводящими к самопроизвольному образованию вихревых структур в пламени и автоколебательному режиму горения, являются: естественная тепловая гравитационная конвекция, гидродинамическое растяжение пламени и вихреобразование в течении со сложным профилем скорости, обусловленным влиянием пограничного слоя на стабилизаторе.

3. Обнаружена гистерезисная зависимость амплитуды акустических колебаний при изменении скорости подвода горючей газовой смеси, что объясняется консервативностью вихревых структур в осциллирующем столбе газа к изменениям внешних условий. При обращении газовоздушного пламени на поперечно расположенном относительно скорости потока стабилизаторе гистерезис проявляется в уменьшении скорости горючей смеси, при которой происходит бифуркация фронта пламени.

4. Возникновение автоколебаний при горении жидкого топлива сопровождается уменьшением массовой скорости горения и увеличением полноты сгорания топлива.

5. Показано, что вихревые структуры, возникающие при автоколебаниях горения, являются причиной увеличения интенсивности теплообмена между фронтом пламени, продуктами горения и стенками камеры сгорания в 1,1 ÷ 1,2 раза. Предложен физический механизм увеличения коэффициента теплоотдачи, связанный с перестройкой поля скоростей в осциллирующем потоке (аннулярным эффектом Ричардсона).

6. Обнаружено явление смены ведущей моды колебаний при горении обращенного пламени на стабилизаторе.

7. Предложено техническое решение, использующее тепловые автоколебания для разработки экономичной технологии сжигания топлива в камерах сгорания с использованием эффекта «поющего» пламени. Разработана модель резонаторной печи для сжигания отходов горючих и смазочных материалов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Мурунов Е.Ю. Резонаторная печь / Е.Ю. Мурунов, В.П. Самсонов // Патент на полезную модель 54417 МПК F24C 9/00 Сург. гос. ун-т. – 2006100889/22; Заявл. 10.01.2006; Опубл. 27.06.2006; Бюл. № 18.

2. Murunov E.Yu. Conditions of excitation of sound for condensed and gas fuels / E.Yu. Murunov, V.P. Samsonov // 13rd Int. Conference on Sound and Vibration: – Vienna, Austria, 2006. – P.P. 42–46.

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

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

5. Murunov E.Yu. Oscillating Conditions and Quenching of inverse Gas Flame in passing Flow / E.Yu. Murunov, V.P. Samsonov // 21th Int. Colloq. on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems: – Poitiers-Futuroscope, France, 2007. – P.P. 105–109.

6. **Мурунов Е.Ю. Роль вихревых структур в механизме возбуждения автоколебательного горения конденсированных систем / Е.Ю. Мурунов, В.П. Самсонов, М.В. Алексеев // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, вып. 8. – С. 34–41.**

7. Мурунов Е.Ю. Низкочастотные колебания открытого диффузионного пламени // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Материалы международной конференции. – Томск, 2007. – С. 135.

8. Мурунов Е.Ю. Влияние гидродинамики пламени на вибрационное горение конденсированных систем / Е.Ю. Мурунов, В.П. Самсонов // Материалы VIII окружной конференции молодых ученых Наука и Инновации XI века. – Сургут, 2008. – Т. 1. – С. 15–16.

9. Мурунов Е.Ю. Экспериментальное исследование поющего обращенного пламени // Материалы IX окружной конференции молодых ученых Наука и Инновации XI века. – Сургут, 2009. – Т. 1. – С. 12.