

На правах рукописи



Чикишев Леонид Михайлович

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В
КАМЕРАХ СГОРАНИЯ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
академик РАН
Маркович Дмитрий Маркович

Официальные оппоненты:

Фурсенко Роман Викторович – доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физико-математического моделирования процессов горения, заведующий лабораторией

Кичатов Борис Викторович – доктор технических наук, ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, лаборатория активных коллоидных систем, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

Защита состоится 28 декабря 2022 года в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан « __ » ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир
Викторович

Актуальность темы исследования обусловлена острой необходимостью создания и развития отечественных образцов современной газотурбинной техники, удовлетворяющих высоким экологическим требованиям. В настоящее время наиболее перспективной технологией с точки зрения снижения вредных выбросов является сжигание «бедной» топливовоздушной смеси (с избытком воздуха). Однако, применение данной технологии сталкивается с рядом существенных проблем, без решения которых создание эффективного и надежного оборудования не представляется возможным. При сжигании «бедных» смесей пламя достаточно сложно стабилизировать в широком диапазоне расходов, что необходимо для эффективной работы на всех режимах. В камере сгорания могут возникать термоакустические явления, которые приводят к режимам вибрационного горения и могут вызывать как к погасанию или проскок пламени внутрь горелочного устройства, так и к разрушению конструктивных элементов камеры сгорания. Так, в настоящее время для двигателей большой мощности данная технология реализована в мире только двумя компаниями: General Electric и Rolls-Royce. Работы по созданию двигателя большой тяги в РФ ведутся АО «ОДК-Авиадвигатель» в рамках программы ПД-35.

В процессе разработки современных камер сгорания широко применяются методы численного моделирования процессов смесеобразования и горения как жидкого, так и газообразного топлива. При этом, имеющихся вычислительных мощностей явно недостаточно для проведения расчетов в реальной геометрии вихреразрешающими методами. Поэтому на практике разработчиками газотурбинного оборудования используются подходы, основанные на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу в стационарной и нестационарной постановке. Такие подходы требуют замыкания уравнений переноса массы и импульса, поэтому крайне важно обосновать применимость градиентных моделей замыкания, используя достоверные экспериментальные данные. Кроме того, достаточно сложным является вопрос прогнозирования нестационарных явлений, связанных с наличием крупномасштабных когерентных вихревых структур в потоке. Так, при организации закрученного течения в сложной геометрии камеры сгорания ГТУ критически важным является наличие и протяженность областей возвратного течения, а также структура течения вблизи стенок жаровой трубы.

Очевидно, что при существенных затратах времени на проведение детальных расчетов, а в инженерной практике расчет, который длится более суток считается неприемлемым, большую роль начинает играть проведение экспериментальных исследований на упрощенных моделях камер сгорания, отражающих важные особенности структуры течения и режимов подачи

топлива и воздуха в камеру сгорания. При этом современный уровень развития методов оптической панорамной диагностики потоков позволяет получать большой массив экспериментальных данных о мгновенной структуре течения. Проведение таких экспериментов требует безусловно высокой квалификации команды из нескольких специалистов и является достаточно сложной задачей, но позволяет получить уникальную достоверную информацию, востребованную при проектировании реальных устройств.

Целью работы является анализ особенностей структуры и динамики закрученного течения, процессов переноса пассивной примеси, моделирующей топливо и стабилизации фронта пламени в модельных камерах сгорания газотурбинного типа, в том числе в условиях, близких к натурным. В ходе выполнения диссертационной работы были решены следующие **задачи**:

- анализ гидродинамической структуры течения для изотермических и реагирующих течений с закруткой потока в модельной камере сгорания цилиндрической геометрии при умеренных числах Рейнольдса с различным значением числа закрутки потока.

- анализ структуры течения и оценка влияния турбулентного переноса и адвекции на массоперенос пассивной примеси, моделирующей топливо, в модельной камере сгорания ГТУ при натуральных значениях числа Рейнольдса (до 150 000) при повышенном давлении (до 2 атм.) в изотермической постановке.

- анализ структуры течения и смесеобразования за двухконтурным фронтовым устройством в модельной камере сгорания с плоскими стенками в зависимости от схемы подачи топлива, исследование влияния температуры воздуха и давления на режимы горения в камере сгорания с двухконтурным фронтовым устройством Turbomeca.

Научная новизна. Впервые выявлена пространственная структура и динамика спиральных вихрей в модели камеры сгорания с сильной закруткой потока. Показано, что как для изотермического течения, так и в случае с горением динамика потока определяется глобальной спиральной модой неустойчивости, выражающейся в наличии двух спиральных вихрей, расположенных во внутреннем и внешнем слоях смещения основной струи и охватывающих зону рециркуляции.

Впервые в модели камеры сгорания при реалистичных значениях числа Рейнольдса и повышенном давлении оценен вклад адвективных и конвективных членов в массоперенос, дана оценка применимости градиентных моделей замыкания уравнений переноса.

Для двухконтурного фронтового устройства измерены пульсации концентрации и напряжения Рейнольдса, проанализированы распределения

функции плотности вероятности концентрации модельного топлива для различных режимов подачи топлива. Оценен вклад когерентных пульсаций скорости в распределения компонент напряжений Рейнольдса. Проанализированы значения когерентной и стохастической компоненты пульсаций концентрации.

Впервые проведены одновременные измерения поля скорости методом анемометрии по изображениям частиц и мгновенного положения фронта пламени методом плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции гидроксильного радикала в модельной камере сгорания при повышенном давлении и температуре окислителя. Анализ измеренных полей скорости для различных режимов горения газофазного топлива показал присутствие когерентных структур, соответствующих как продольным, так и поперечным модам гидродинамической неустойчивости. Показано, что возникновение термоакустических пульсаций вызвано усилением продольной моды и сопряжено с отрывом пламени, накоплением топлива в центральной зоне рециркуляции и последующим кратковременным быстрым сгоранием, что приводит к генерации интенсивных пульсаций давления.

Теоретическая и практическая значимость работы. В рамках данной работы разработаны и созданы экспериментальные стенды, обеспечивающие проведение исследований структуры течения, смещения и горения в модельной камере сгорания газотурбинного типа панорамными оптическими методами при реалистичных значениях расхода воздуха, а также при повышенном давлении и подогреве воздуха.

Впервые проведены одновременные измерения мгновенных полей скорости и концентрации пассивной примеси, моделирующей топливо, что позволило оценить вклад когерентных структур в массоперенос и оценить применимость градиентных моделей замыкания при решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу для данного типа течений.

Впервые для модельного двухконтурного горелочного устройства проведены измерения структуры течения и положения фронта пламени при повышенном давлении и температуре, что позволило получить количественные оценки вклада крупномасштабных вихревых структур, включая прецессирующее вихревое ядро, в турбулентный перенос и перемешивание как для топлива в основной, так и в дежурной зоне. Измеренные поля скорости для различных режимов горения метана и синтез газа показали присутствие когерентных структур, соответствующих как продольным, так и поперечным модам гидродинамической неустойчивости.

Методы исследования. В работе использованы хорошо зарекомендовавшие себя в мировой практике экспериментальные методы исследования: анемометрия по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry), в том

числе с высоким временным разрешением, плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция (Planar Laser-Induced Fluorescence), высокоскоростная регистрация хемилюминесценции гидроксильного радикала. Для анализа массивов экспериментальных данных был применен метод главных компонент (Proper Orthogonal Decomposition) и разложения по динамическим модам (Dynamic Mode Decomposition). Все начальные условия и рабочие параметры в ходе экспериментов задавались и контролировались с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования структуры закрученного течения в модельной камере сгорания газотурбинного типа, позволяющие идентифицировать пространственную структуру когерентных пульсаций поля скорости.

2. Результаты экспериментального исследования структуры течения в модельной камере сгорания газотурбинного типа с двухконтурным фронтальным устройством при реалистичных значениях расхода воздуха, позволяющие оценить вклад конвективного и адвективного членов в перенос пассивной примеси, а также оценить применимость градиентной модели замыкания для уравнений переноса.

3. Результаты количественного анализа влияния вихревых структур на массоперенос и перемешивание в модельной камере сгорания газотурбинного типа с двухконтурным фронтальным устройством. Результаты исследования горения газофазного топлива при повышенном давлении и температуре, позволяющие определить гидродинамические моды неустойчивости в потоке и особенности механизма стабилизации фронта пламени.

Достоверность полученных результатов основана на использовании верифицированных методов измерений и обработки экспериментальных данных, широко применяемых во всем мире. Кроме того, результаты измерений сопоставлялись как с результатами экспериментов, полученных другими авторами для горелочных устройств схожей геометрии, так и с результатами численного моделирования, проведенного методом крупных вихрей.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования осуществлялась совместно с научным руководителем академиком РАН Марковым Д.М. Основные научные результаты и выводы, послужившие основой диссертации и выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Автор непосредственно участвовал в создании экспериментальных стендов, отладке и адаптации измерительных методик,

проведении измерений, обработке и анализе экспериментальных данных и подготовке результатов исследований к публикации.

Апробация работы. Результаты исследований неоднократно обсуждались на ряде российских и международных конференций и семинаров: Международная научная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Алушта, 2009, 2012), Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» (Новосибирск, 2009, 2012), Международная конференция по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2010, 2020, Пермь, 2016), International Symposium on Flow Visualization (Тэгу, 2010), Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Москва, 2011), Mediterranean Combustion Symposium (Кальяри, 2011), «Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики» (Ниžний Новгород, 2011), «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2011), International Symposium on Particle Image Velocimetry (Делфт, 2013), Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Пусан, 2013, Неаполь, 2015), Всероссийская конференция молодых ученых «Новые нетрадиционные возобновляемые источники энергии» (Новосибирск, 2013), Научно-технический конгресс по двигателестроению (Москва, 2014), Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2014), Asian Symposium on Visualization (Новосибирск, 2015), Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века» (Москва, 2015), Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015, 2021), Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2015), Научно-техническая конференция «Аэродинамика, термодинамика, горение в ГТД и ПВРД» (Новосибирск, 2015), Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (г. Москва, 2015), International Symposium on Combustion (Аделаида, 2021), Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2019, 2021).

Публикации

Результаты работы представлены в 24 статьях, все они опубликованы в журналах из списка, рекомендованного ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций по теме диссертации. Диссертация изложена на 151 странице, включая 84 рисунка. Библиографический список литературы включает 158 наименований работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, характеризуется степень ее разработанности, осуществляется выбор предмета, объекта и методов исследования, определяются цели и задачи работы, формулируются положения, выносимые на защиту, их научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость, описывается структура диссертации.

В **первой главе** приведен обзор современного состояния проблемы, а именно: проведен краткий обзор технологий малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинного типа (раздел 1.1). В результате данного обзора сделан вывод, что наиболее перспективной технологией является сжигание обедненной предварительно перемешанной топливовоздушной смеси, однако ее применение является ограниченным вследствие наличия нестационарных явлений, оказывающих существенное влияние на стабилизацию пламени и явление термоакустического резонанса. В разделе 1.2 представлены имеющиеся в литературе данные о структуре течения в камерах сгорания с закруткой потока, полученные как экспериментальными методами, так и при помощи численного моделирования. Далее в разделе 1.3 представлены применяемые в настоящее время методы оптической диагностики потоков, в том числе при наличии горения. В результате данного обзора был сделан вывод, что наиболее подходящими подходами для проведения исследования являются анемометрия по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry - PIV) и плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция. В разделе 1.4 представлена информация о имеющихся в мире передовых экспериментальных стендах, моделирующих течение и горение в камерах сгорания газотурбинного типа с оптическим доступом, отмечены необходимые режимные параметры и используемые технические решения, позволяющие эффективно проводить оптические измерения.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных стендов и используемых методик. В данной работе использовалось три экспериментальных стенда:

1. Модельная камера сгорания цилиндрической геометрии, работающая при нормальных условиях при умеренных числах Рейнольдса, позволяющая использовать завихрители с различной геометрией (Рисунок 1 слева).

2. Модельная камера сгорания цилиндрической геометрии, работающая при повышенном давлении (до 2 атм.) и реалистичных значениях расхода воздуха (число Рейнольдса до 150 000), моделирующая течение за фронтовым устройством камеры сгорания ГТУ (Рисунок 1 по центру).

3. Модельная камера сгорания с плоскими окнами визирования, работающая как при нормальных условиях, так и при повышенном давлении, позволяющая исследовать смешение и горение за двухконтурным фронтальным устройством модельной геометрии дизайна TURBOMECA (Рисунок 1 справа).

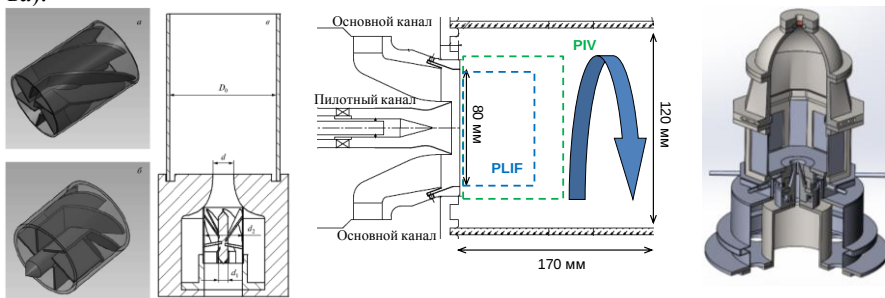


Рисунок 1. Схемы рабочих участков экспериментальных установок.

Схема двухконтурного фронтального устройства и расположения измерительного оборудования представлена на Рисунке 2.

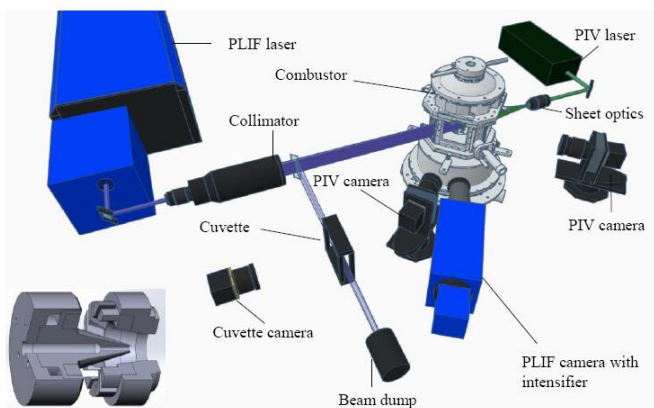


Рисунок 2. Схема двухконтурного фронтального устройства и расположения измерительного оборудования.

В работе использованы хорошо зарекомендовавшие себя в мировой практике экспериментальные методы исследования: анемометрия по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry), в том числе с высоким временным разрешением, плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция (Planar Laser-Induced Fluorescence) паров ацетона и гидроксильного радикала, высокоскоростная регистрация

хемилюминесценции гидроксильного радикала. Для анализа массивов экспериментальных данных были применены методы анализа стохастических динамических систем POD (Proper Orthogonal Decomposition), DMD (Dynamic Mode Decomposition) и метод главных компонент (PCA, Principal Component Analysis). Все начальные условия и рабочие параметры в ходе экспериментов задавались и контролировались с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и анализа динамики течения в модельной камере сгорания цилиндрической геометрии для различной степени закрутки потока при нормальных условиях [1, 2, 3]. В качестве топлива использовался метан. На Рисунке 3 представлены распределения сигнала хемилюминесценции и поля средней скорости для двух различных значений параметра закрутки потока. В случае сильной закрутки пламя имело форму расширяющегося конуса, нижняя точка которого располагалась внутри соплового блока. При слабой закрутке поверхность пламени была существенно деформирована турбулентными пульсациями потока, но, в среднем, также имело V-образную форму. Существенным отличием от сильной закрутки является то, что нижняя точка слабо-закрученного пламени находилась на расстоянии около $0,5d$ от выходного отверстия горелочного сопла.

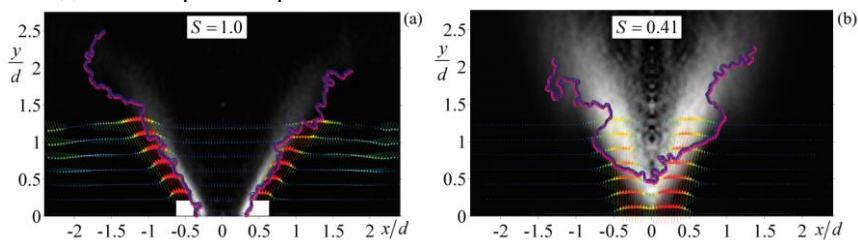


Рисунок 3. Обратное преобразование Абеля сигнала хемилюминесценции радикала CH^* (шкала в градациях серого) и значение средней скорости для (а) сильно-закрученного пламени и (б) слабо-закрученного обедненных пламен. Сплошной линией показаны изображения хемилюминесценции радикала CH^* с временем экспозиции 200 мкс.

Наблюдалось хорошее совпадение характеристик среднего течения с результатами численного моделирования, выполненного методом крупных вихрей [1]. Для сильной закрутки потока в случаях с горением и при его отсутствии пульсации скорости соответствовали выделенному пику на частоте прецессии вихревого ядра потока. В отсутствие горения численное моделирование и эксперимент демонстрируют пик на частоте 222 Гц. Для потока с горением частота прецессии была значительно больше, полученная

в эксперименте величина составила 257 Гц, что на 15 % превышает значение для изотермического случая.

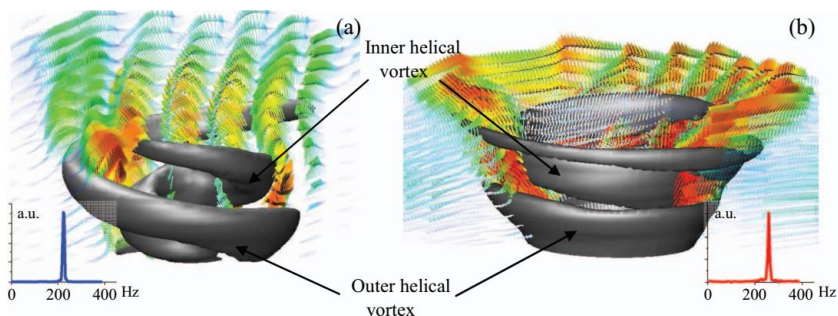


Рисунок 4. Когерентные вихревые структуры в сильно-закрученном потоке без горения (а) и при горении метановоздушной смеси (б). Поле скорости получено методом PIV с условным осреднением, изоповерхность соответствует положительной величине Q-критерия.

На Рисунке 4 представлены фазово-осредненные пространственные распределения скорости и изоповерхности положительного значения Q-критерия для изотермического течения и для пламени, полученные из низкоразмерной реконструкции структуры течения по первым двум POD-модам. Q-критерий был построен по 3D фазово-осредненным полям скорости исходя из предположения, что азимутальный угол равен фазовому (т.е. фазовая скорость спиральной структуры равна скорости вращения). Для обоих случаев в потоке могут быть выделены спиральные вихревые структуры. Рисунок демонстрирует существование двойной спиральной структуры с одним вихрем во внешнем слое смешения (между основной струей и угловой зоной рециркуляции) и вторым во внутреннем слое смешения (между основной струей и центральным обратным течением). В случае горения наблюдается более широкий угол раскрытия и значительно меньший шаг спирали, что вызвано влиянием термического расширения газа. Несмотря на влияние горения, сильно-закрученное течение характеризуется наличием распада вихревого ядра в форме пузыря. Динамика потока определяется глобальной спиральной модой неустойчивости, выражающейся в наличии двух спиральных вихрей, расположенных во внутреннем и внешнем слоях смешения основной струи и охватывающих зону рециркуляции.

В четвертой главе представлены результаты исследований структуры течения в модельной камере сгорания цилиндрической геометрии при

реалистичных значениях расхода воздуха [19, 20, 21]. Для проведения исследований использовался экспериментальный стенд, созданный в рамках взаимодействия с АО «ОДК-Авиадвигатель». В качестве объекта исследования выступало модельное двухконтурное фронтное устройство (Рисунок 1 по центру). Число Рейнольдса составляло $1,5 \times 10^5$. Для проведения измерений поля скорости в изотермической постановке в поток добавлялись трассеры – частицы водоглицеринового раствора. Для моделирования переноса пассивной примеси в поток добавлялись пары ацетона.

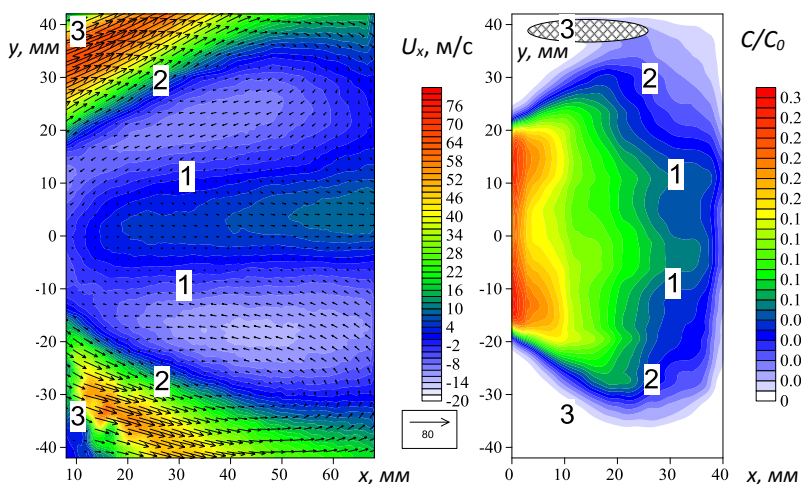


Рисунок 5. Поле средней скорости и средней концентрации пассивной примеси.

На Рисунке 5 представлены поля средней скорости газа и концентрации пассивной примеси. Течение представляет собой закрученный поток, с образованием центральной зоны возвратного течения, по центру которой осуществляется подача модельного топлива. Таким образом, в потоке присутствуют три области сдвигового течения, где можно ожидать наличия интенсивных турбулентных пульсаций скорости и концентрации (обозначены на Рисунках 5-7 цифрами 1-3). Отличная от нуля концентрация модельного топлива достигается только в области, ограниченной углом раскрытия закрученного потока воздуха (что обусловлено конструкцией фронтного устройства). Интенсивность пульсации аксиальной компоненты вектора скорости малы в центральной области и достигают своего максимума в области (2) (Рисунок 6), что соответствует слою смешения потоков, поступа-

ющих из основного и пилотного каналов фронтального устройства. В то же время интенсивность пульсаций концентрации в области возвратных токов (1) относительно мала.

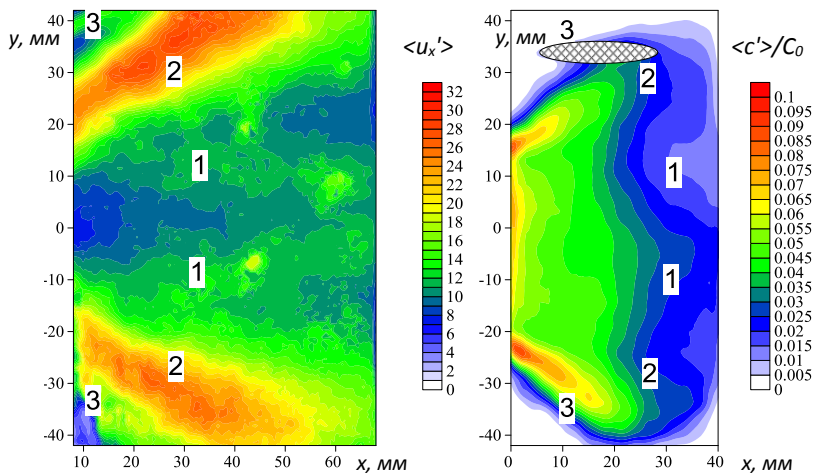


Рисунок 6. Поле интенсивности пульсаций аксиальной компоненты скорости и пульсаций концентрации пассивной примеси

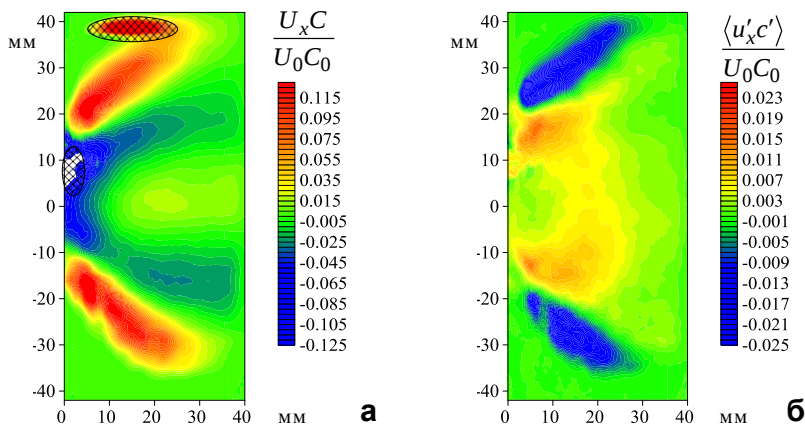


Рисунок 7. Распределение аксиальной компоненты адвективного потока (а) и турбулентного потока (б) пассивной примеси (заштрихованы области, в которых влияние оптических бликов приводит к ошибочным результатам измерений).

На Рисунке 7 представлено распределение аксиальной компоненты турбулентного потока пассивной примеси. В отличие от компонент адвективного переноса максимум аксиальной компоненты турбулентного переноса пассивной примеси достигается внутри центральной зоны рециркуляции. В области слоя смешения аксиальные компоненты адвективного и турбулентного переноса имеют разный знак (противоположно направлены). Характерные значения адвективной составляющей в 5-10 раз превышают значения турбулентной составляющей.

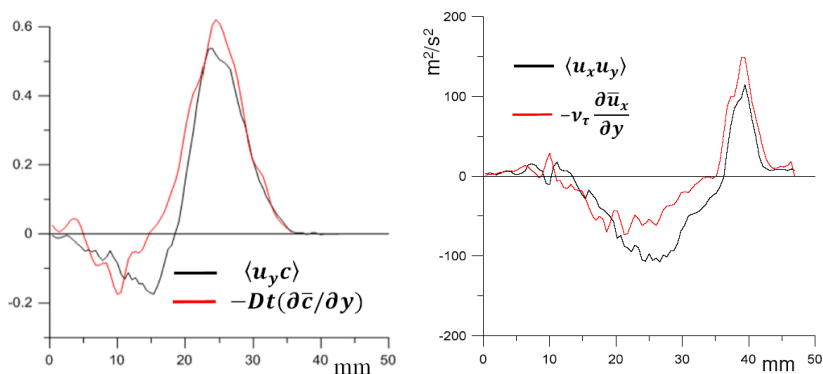


Рисунок 8. Профиль радиальной компоненты турбулентного потока $\langle u_y \rangle$ и среднего градиента концентрации (слева) и профили компоненты напряжений Рейнольдса и градиента скорости (справа).

На Рисунке 8 представлены распределения турбулентного трения и турбулентного потока в сечении 0,1D, а также соответствующие градиенты средних характеристик с учетом коэффициентов турбулентного переноса (турбулентной вязкости и диффузии). Можно видеть, что предположение постоянства коэффициентов по сечению, дает хорошее соответствие предсказания модели и напрямую измеренных величин турбулентного переноса. Такая оценка дает значение турбулентной вязкости около 0,01, коэффициента турбулентной диффузии 0,028, и соответствующее значение турбулентного числа Шмидта $Sc_t = 0,35$.

В пятой главе представлены результаты исследования турбулентного переноса и смешения топлива в модельной камере сгорания газотурбинного типа с фронтовым устройством разработки TURBOMECA в отсутствие горения [5], а также результаты исследования пламен метана и синтез-газа как при нормальных условиях, так и при повышенном давлении и подогрева воздуха. Приведено сравнение двух режимов подачи топлива (метан с

парами ацетона). Особенностью данного фронтального устройства является возможность подачи топлива в отверстия между лопаток радиального завихрителя для создания обедненной топливовоздушной смеси с предварительно перемешанным режимом горения в области дежурного пламени. Для проведения исследования применялся метод анемометрии по изображениям частиц в стереоскопической конфигурации и метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции паров ацетона/гидроксильного радикала для измерения полей скорости и концентрации/положения фронта пламени в потоке с числом Рейнольдса 3×10^4 . Экспериментальные данные анализировались с применением метода главных компонент для определения когерентных структур и количественной оценки их влияния на крупномасштабные пульсации концентрации. В обоих случаях динамика потока была связана с движением крупномасштабных вихревых структур во внутреннем и внешнем слоях смешения. Когерентные пульсации потока обеспечивают вклад в турбулентный массоперенос, интенсивность которого локально превышает 60 % для турбулентного напряжения Рейнольдса и потоков Рейнольдса. Смешение анализировалось с применением локальной функции плотности вероятности пульсаций концентрации. Распределение когерентной и стохастической компонент пульсаций рассматривалось отдельно. Для предварительной перемешанного режима подачи топлива вариации локального отношения топливо/окислитель на выходе из основного канала достигали 35 % с вкладом когерентных структур до 7 %. Напротив, крупномасштабные вихревые структуры в случае диффузионного режима центральной струи в основном оказывают влияние на адвекцию, а не на перемешивание. В данной главе получены результаты, обладающие важностью для валидации методов численного моделирования нестационарного турбулентного перемешивания в камерах сгорания с закруткой потока.

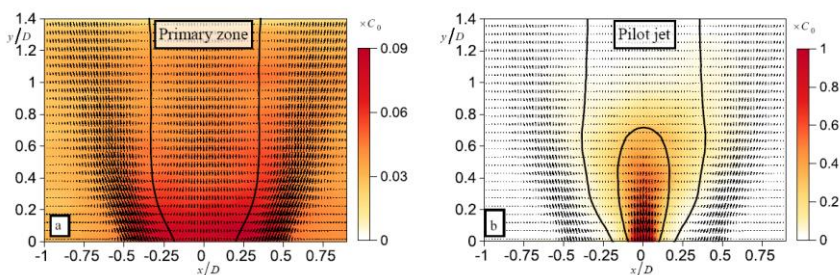


Рисунок 9. Осредненное по времени поле скорости и нормированной концентрации для предварительно перемешанного (а) и пилотного (б) режима подачи топлива модельной камеры сгорания в условиях потока без горения.

Двумерные измерения поля скорости и концентрации проводились в центральной плоскости (x, y) потока. Начало системы координат с осями (x, y, z) определено в центре выхода из сопла. В плоскости измерения $z=0$. На Рисунке 9 представлены осредненные по времени поля скорости и концентрации для двух режимов подачи топлива (метан подавался в первичную зону и в качестве пилотной струи). В направлении y показан каждый четвертый вектор. Сплошной линией ограничена область с $U_y=0$. В обоих случаях в потоке присутствует центральная зона рециркуляции. Центральная струя проникает в центральную зону рециркуляции и топливо (в среднем) захватывается обратным потоком. В режиме предварительного перемешивания концентрация топлива достаточно однородна с максимумом значений на выходе из сопла. Топливо разбавляется вниз по потоку вследствие вовлечения потока из угловой зоны рециркуляции.

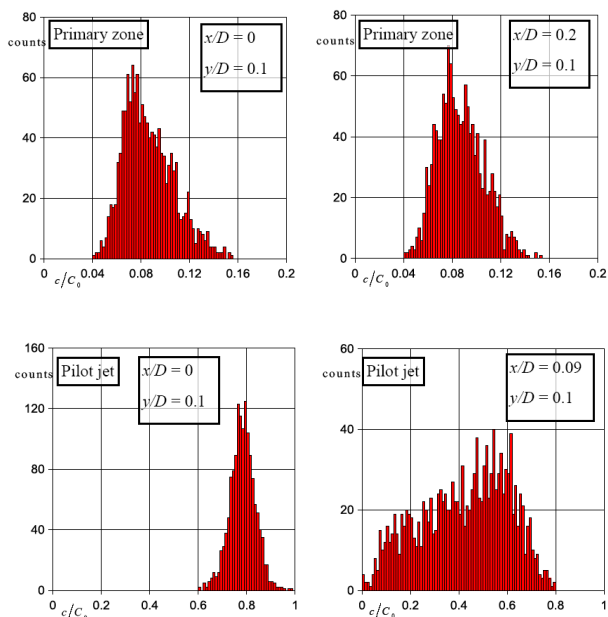


Рисунок 10. Локальные значения концентрации топлива над центром выхода сопла с завихрителем и в слое смешения для предварительно перемешанного и пилотного режима подачи топлива.

На Рисунке 10 представлены гистограммы локальной концентрации топлива, визуализирующие функцию плотности вероятности. Даже для оси пилотной струи быстрое перемешивание возникает в момент, когда струя

встречается с нестационарным обратным течением в зоне рециркуляции. В слое смешения между пилотной струей и зоной рециркуляции гистограмма значительно шире и демонстрирует существенную асимметрию в области больших значений. Для предварительно перемешанного режима подачи топлива, ширина гистограммы на выходе из сопла и во внутреннем слое смешения между кольцевой струей и центральной зоной рециркуляции являются сравнимыми.

Чтобы продемонстрировать нестационарную динамику течения и переноса топлива на Рисунке 11 представлены примеры мгновенных распределений скорости (показан каждый второй вектор по осям x и y) и концентрации. Для обоих режимов подачи топлива, перенос и смешение носят существенно нестационарный характер. Для предварительно перемешанного режима крупномасштабные вихри (указаны стрелкой) захватывают топливо из основного канала и переносят его внутрь зоны рециркуляции. Ядро пилотной струи, натекающее на центральное обратное течение, отклоняется и быстро разрушается вниз по потоку от выхода из центрального сопла. Таким образом, крупномасштабные вихревые структуры во внутреннем слое смешения обеспечивают интенсивное вовлечение топлива в центральную зону рециркуляции.

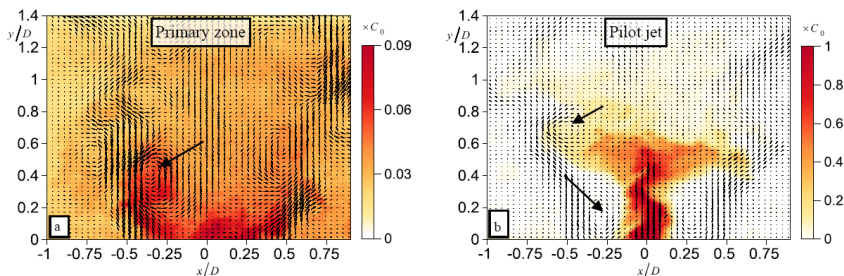


Рисунок 11. Поля мгновенной скорости и нормированной концентрации для предварительно перемешанного режима (а) и пилотного режима (б) подачи топлива. Примеры крупномасштабных вихревых структур показаны стрелкой.

Осредненная по времени структура течения для различных пламен представлена на Рисунке 12. Вектора скорости нормированы на среднераходную скорость потока воздуха, которая составляла 6,36 и 5,43 м/с для случая нормальных условий и повышенного давления (2 атм.) с подогревом окислителя до 500 К. Распределение сигнала лазерно-индуцированной флуоресценции радикала ОН нормировано на максимальное значение. Данные получены в центральной плоскости сечения потока с центром начала координат в точке (0, 0), расположенной в центре пилотного канала на выходе из сопла.

Для всех случаев присутствует центральная зона рециркуляции. Для пламен метана при нормальных условиях максимальный поперечный размер зоны рециркуляции составляет $0,76 D$. Повышение давления и температуры не оказывает существенного влияния на пространственное распределение поля скорости. Однако, химическая реакция во внутреннем слое смешения начинает протекать в более узкой области для случая повышенного давления и температуры.

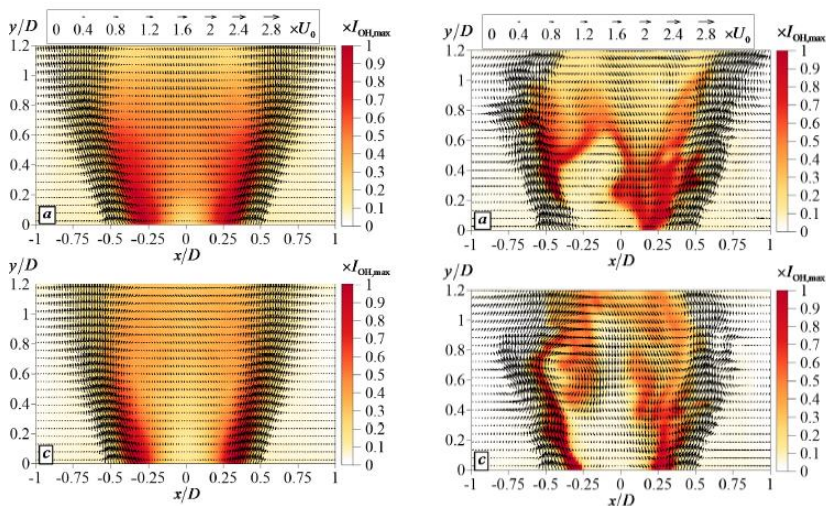


Рисунок 12. Осредненные по времени и мгновенные поля скорости и интенсивности флуоресценции гидроксильного радикала для метановоздушного пламени при нормальных условиях (вверху) и повышенном давлении и температуре (внизу).

На Рисунке 12 справа представлены поля мгновенной скорости и данные флуоресценции гидроксильного радикала. Поля скорости демонстрируют наличие крупномасштабных вихревых структур вокруг кольцевого закрученного течения. Более того, обратное течение является неустойчивым. Картины флуоресценции для пламени метана при нормальных условиях показывают, что пламя может быть стабилизировано на расстоянии от сопла, то есть основание фронта пламени с одной стороны расположено снаружи области завихрителя. Для условий повышенного давления пламя стабилизируется внутри сопла, практически для всех мгновенных реализаций.

Наиболее интенсивная мода пульсаций была обнаружена для метана при нормальных условиях. Эта мода представлена на Рисунке 13, где цветом

показано фазово-осредненное значение пульсаций интенсивности сигнала флуоресценции гидроксильного радикала. Эта мода соответствует поперечной гидродинамической неустойчивости с асимметричными пульсациями компонент вектора скорости и интенсивности флуоресценции. Напротив, вторая мода связана с симметричными пульсациями скорости вдоль кольцевой струи и симметричными пульсациями ОН в ядре потока. Эти два различных типа POD-мод связаны с крупномасштабными поперечными и продольными модами гидродинамической неустойчивости. Для пламени метана при повышенном давлении и температуре, POD-спектр соответствует монотонному снижению кинетической энергии с увеличением номера моды. Как показано на Рисунке 13 внизу первая мода связана с околосимметричными пульсациями в верхней части рециркуляционного пузыря и ярко выраженными когерентными пульсациями продольной скорости. Эта мода соответствует продольной неустойчивости.

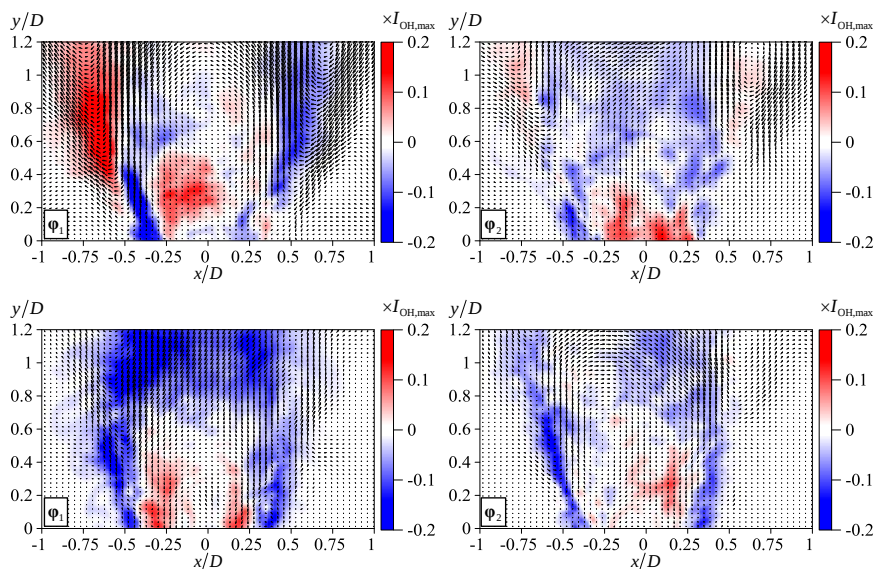


Рисунок 13. Первые две POD-моды и фазово-осредненные интенсивности пульсаций флуоресценции гидроксильного радикала для метана при нормальных условиях (вверху) и при повышенном давлении и температуре (внизу).

Примеры мгновенных изображений хемилюминесценции представлены на Рисунке 14. При нормальных условиях, фронт пламени стабилизирован вокруг центральной зоны рециркуляции и проникает внутрь сопла. Также наблюдаются частично поднятые пламена, когда унос пламени возникает с одной стороны потока. Для условий повышенного давления и температуры

динамика пламени является более сложной, связанной с периодическим отрывом всего пламени, турбулентным распространением против вращающегося кольцевого потока, а также частыми событиями глобального погасания пламени после проникновения фронта пламени внутрь завихрителя. Однако, пламя не уносится потоком вследствие присутствия центральной диффузионной пилотной струи.

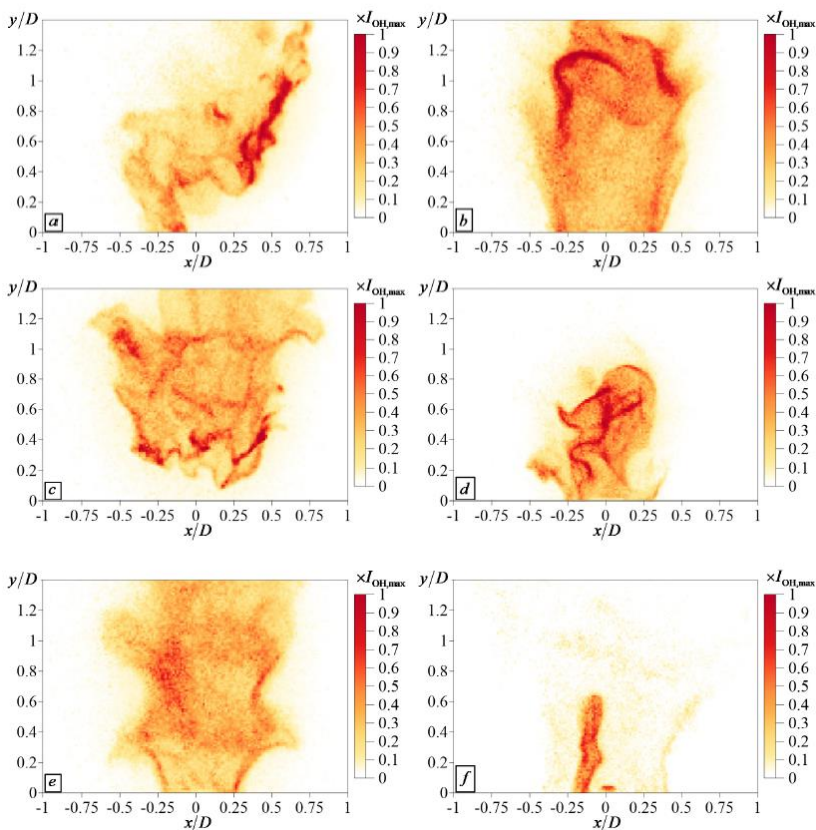


Рисунок 14. Мгновенные изображения хемилюминесценции радикала OH^* для метана (a, c, e) и синтез-газа (b, d, f) при нормальных условиях (a, b) и повышенном давлении и температуре (c, f).

Анализ пульсаций хемилюминесценции радикала OH выполненный методом главных компонент. Первые четыре PCA-моды для изображений OH^* хемилюминесценции для метана при нормальных условиях представлены на Рисунке 15. Первая и вторая мода четко связаны с

поперечным и продольными модами крупномасштабных когерентных пульсаций фронта пламени. Для данного случая характерная частота для временных коэффициентов для поперечной моды составляет 26 Гц и числу Струхала $St_T=0,15$. Для продольной моды, такого пика в спектре не было обнаружено. Для других случаев, различие в амплитуде мод не является столь выраженным. Однако, для каждого пламени, были обнаружены два подобных типа мод, а именно, симметричный и асимметричный.

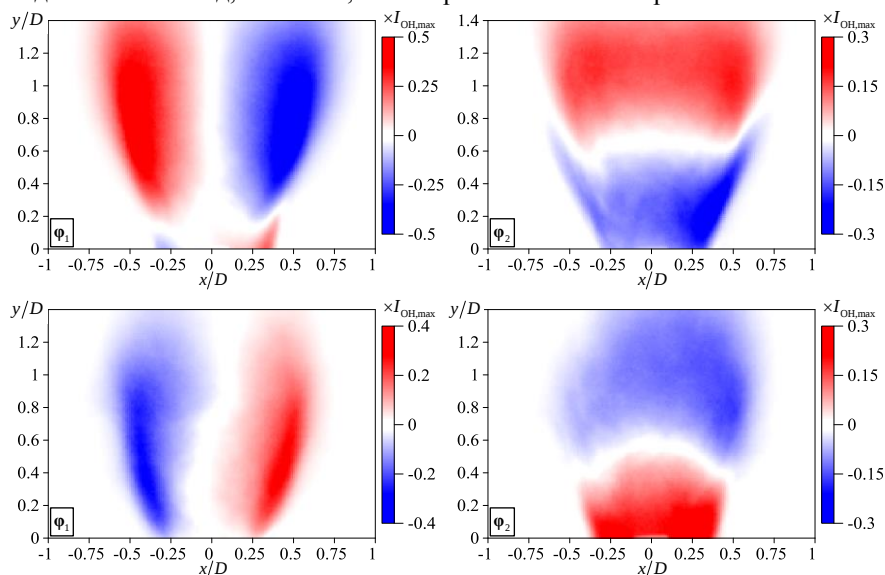


Рисунок 15. Первые две РСА-моды хемилюминесценции радикала OH^* для пламени метана при нормальных условиях (вверху) и при повышенном давлении и температуре (внизу).

Резюмируя выше сказанное, можно отметить, что динамика бедного метанового пламени вблизи срыва связана с событиями асимметричного отрыва фронта пламени от сопла, накоплением метана внутри области центральной зоны рециркуляции (вследствие наличия центральной пилотной струи), и последующим проникновением фронта пламени внутрь сопла завихрителя. Для условий повышенного давления наблюдался отрыв метанового пламени как целого с последующим проникновением в завихритель с погасанием внутри и последующим воспламенением внутри камеры сгорания за счет диффузии центральной струи. Динамика потока и фронта пламени определяются двумя типами гидродинамических мод неустойчивости: поперечными и продольными.

В заключении представлены основные результаты работы:

Для модельной камеры сгорания цилиндрической геометрии экспериментально показано, что степень закрутки потока существенно влияет на механизм стабилизации пламени обедненной метановоздушной смеси при атмосферном давлении. В результате применения методов понижения размерности стохастических динамических систем показано, что как для изотермического, так и для реагирующего течения в случае сильной закрутки потока течение характеризуется распадом вихря в форме пузыря. Динамика потока определяется глобальной спиральной модой неустойчивости, представляющей собой два спиральных вихря, один из них возникает во внутреннем, а другой во внешнем сдвиговом слое струи/пламени, окружающей зону рециркуляции в форме пузыря.

Впервые проведены экспериментальные исследования структуры закрученного течения и смесеобразования в модельной камере сгорания ГТУ при реалистичных значениях расхода воздуха и повышенном давлении для двухконтурного фронтального устройства. Оценен вклад адвективной и конвективной компонент в массоперенос пассивной примеси, моделирующей топливо. Выполнена оценка применимости градиентных моделей замыкания для уравнения переноса.

Впервые даны количественные оценки вклада крупномасштабных вихревых структур, включая прецессирующее вихревое ядро, в турбулентный перенос и перемешивание для топлива как в основной, так и в пилотной зоне двухконтурного фронтального устройства. Анализ измеренных полей скорости для различных режимов горения метана и синтез-газа показал присутствие когерентных структур, соответствующих как продольным, так и поперечным модам гидродинамической неустойчивости.

Показано, что возникновение термоакустических пульсаций в камере сгорания при повышенном давлении вызвано усилением продольной моды и сопряжено с отрывом пламени, накоплением топлива в центральной зоне рециркуляции и последующим кратковременным быстрым сгоранием, что приводит к генерации интенсивных пульсаций давления.

Основные результаты диссертации опубликованы в 24 публикациях в рецензируемых периодических изданиях из списка, рекомендованного ВАК:

1. Дулин В.М., Маркович Д.М., Минаков А.В., Ханъялич К., **Чикишев Л.М.** Экспериментальное и численное моделирование закрученного течения в камере сгорания // Известия РАН: Энергетика. – 2013. – Т. 39. – С. 137-147.
2. Алексеенко С.В., Маркович Д.М., Дулин В.М., **Чикишев Л.М.** (2013) Исследование прецессии вихревого ядра в камерах сгорания // Теплофизика и аэромеханика. – Т. 20, № 6. – С. 695-704.
3. Markovich D.M., Abdurakipov S.S., **Chikishev L.M.**, Dulin V.M., Hanjalic K. Comparative analysis of low- and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions // Physics of Fluids. – 2014. – 26. – 065109.

4. Dulin V.M., Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V., Lobasov A.S., **Chikishev L.M.**, Markovich D.M., Wang S., Fu C., Liu X., Li Y., Gao Y. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the $A^2\Sigma^+-X^2\Pi$ (1-0) band // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2021. – V. 38. – № 1. – P. 1877-1883.
5. Sharaborin D.K., Savitskii A.G., Bakharev G.Y., Lobasov A.S., **Chikishev L.M.**, Dulin V.M. PIV/PLIF investigation of unsteady turbulent flow and mixing behind a model gas turbine combustor // *Experiments in Fluids*. – 2021. – T. 62. – № 5. – P. 1-19.
6. Dulin V.M., **Chikishev L.M.**, Sharaborin D.K., Lobasov A.S., Tolstoguzov R.V., Liu Z., Shi X., Li Y., Markovich D.M. On the Flow Structure and Dynamics of Methane and Syngas Lean Flames in a Model Gas-Turbine Combustor // *Energies*. – 2021. – V. 14. – P. 8267.
7. **Chikishev L.M.**, Sharaborin D.K., Lobasov A.S., Dekterev Ar.A., Tolstoguzov R.V., Dulin V.M., Markovich D.M. LES simulation of coherent flow structures in a model gas-turbine lean combustor. Impact on the temperature field and concentration of CO and NO // *Energies*. – 2022. – V. 15. – P. 4362.
8. Tolstoguzov R.V., **Chikishev L.M.** Temperature field measurements between a Bunsen flame and flat a cold plate by using PLIF // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – V. 2233. – № 1. – P. 012014.
9. Лобасов А.С., Толстогузов Р.В., Шараборин Д.К., **Чикишев Л.М.**, Дулин В.М. Об эффективности использования различных линий возбуждения перехода (1-0) флуоресценции ОН для панорамной термометрии // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2021. – Т. 28, № 5. – С. 793-797.
10. Алексеев С.В., Бутаков Е.Б., **Чикишев Л.М.**, Шараборин Д.К. Экспериментальное исследование диффузионного горения мелкодисперсной пылеугольной взвеси в газовой струе CH_4-N_2 // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2020. – Т. 61, № 5(363). – С. 88-94.
11. Лобасов А.С., **Чикишев Л.М.**, Дулин В.М., Маркович Д.М. Когерентные структуры и турбулентный перенос на начальном участке струй и пламени в потоке с закруткой // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2020. – Т. 61, № 3. – С. 42-51.
12. Abdurakipov S.S., Lobasov A.S., **Chikishev L.M.**, Dulin V.M. Analysis of eigenmodes in a swirling jet and flame: 3D PIV and PLIF study // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1382, № 1. – P. 012051.
13. Dulin V.M., Lobasov A.S., **Chikishev L.M.**, Markovich D.M., Hanjalic K. On Impact of Helical Structures on Stabilization of Swirling Flames with Vortex Breakdown // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2019. – Vol. 103, № 4. – P. 887-911.
14. **Chikishev L.M.**, Dulin V.M., Lobasov A.S., Markovich D.M. Combined application of OH PLIF, HCHO PLIF and stereo PIV to a turbulent premixed swirling flame // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2027. – P. 030142.
15. Лобасов А.С., Абдуракипов С.С., **Чикишев Л.М.**, Дулин В.М., Маркович Д.М. Исследование формы пламени в нестационарном потоке закрученной турбулентной струи методом HCHO PLIF // *Физика горения и взрыва*. – 2018. – Т. 54, № 6. – С. 17-24.

16. Lobasov A.S., **Chikishev L.M.** Investigation of turbulent swirling jet-flames by PIV/OH PLIF/HCHO PLIF // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 980, № 1. – P. 012033.
17. Кравцов З.Д., Толстогузов Р.В., **Чикишев Л.М.**, Дулин В.М. О формировании застойной зоны в потоке между пламенем в форме конуса и плоской преградой // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 329-332.
18. Lobasov A.S., **Chikishev L.M.**, Dulin V.M. Comparison between premixed and partially premixed combustion in swirling jet from PIV, OH PLIF and HCHO PLIF measurements // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 899, № 6. – P. 062002.
19. **Чикишев Л.М.**, Дулин В.М., Гобызов О.А., Маркович Д.М. Исследование смесеобразования в модели камеры сгорания ГТУ с использованием панорамных оптических методов // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 3. – С. 357-364.
20. **Chikishev L.M.**, Gobyzov O.A., Sharaborin D.K., Lobasov A.S., Dulin V.M., Markovich D.M., Tsatiashvili V.V. Turbulent transport measurements in a model of GT-combustor // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 030028.
21. Gobyzov O.A., **Chikishev L.M.**, Lobasov A.S., Sharaborin D.K., Dulin V.M., Bilsky A.V., Tsatiashvili V.V., Avgustinovich V.G., Markovich D.M. Turbulent transport measurements in a cold model of GT-burner at realistic flow rates // EPJ Web of Conferences. – 2016. – Vol. 114 – P. 02032.
22. Kravtsov Z.D., Tolstoguzov R.V., **Chikishev L.M.**, Dulin V.M. PIV and OH PLIF study of impinging propane-air jet-flames // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 754, № 7, P. 072001.
23. Kravtsov Z.D., **Chikishev L.M.**, Dulin V.M. Acetone PLIF concentration measurements in a submerged round turbulent jet // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1770. – P. 040018.
24. Дулин В.М., Маркович Д.М., Токарев М.П., **Чикишев Л.М.** Применение современных оптических методов для диагностики пространственной структуры турбулентных пламен // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – №. 3. – С. 22-32.