

На правах рукописи

Толстогузов Роман Владимирович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
ИМПАКТНОЙ СТРУИ С ЗАКРУТКОЙ И ГОРЕНИЕМ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

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, профессор РАН
Дулин Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: Гурьянов Александр Игоревич –
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева, и. о. директора
института «Авиационных технологий и инженерной
физики»

Литвиненко Юрий Алексеевич –
доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт
теоретической и прикладной механики им. С.А.
Христиановича Сибирского отделения Российской
академии наук, старший научный сотрудник
лаборатории «Аэрофизических исследований
дозвуковых течений»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

Защита состоится 15 ноября 2023 года в 9 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета 24.1.129.01 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского
отделения Российской академии наук 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 направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета
24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail:
dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

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



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В большом количестве промышленных и технических приложений сжигание горючего газа происходит вблизи стенок. В частности, это имеет место при нагреве поверхностей, резке металлов, горении в камерах сгорания, в различных горелочных устройствах, а также в химической промышленности и других областях. Горение вблизи стенок может приводить к нежелательным эффектам: изменению пределов устойчивого горения, возникновению автоколебаний, изменению условий протекания химических реакций. С каждым годом становятся все строже экологические требования к уровню вредных выбросов промышленных установок и двигателей внутреннего сгорания. Для повышения эффективности сжигания топлива, уменьшения размеров камер сгорания и для учета нежелательных эффектов, которые могут возникнуть при горении вблизи стенок, необходимо развивать достоверные математические модели процессов тепломассообмена при факельном горении вблизи холодных преград. Проведение натурных экспериментов в реальных условиях является слишком дорогим и технически сложно реализуемым. Поэтому при разработке новых горелочных устройств и камер сгорания все больше используются численные методы моделирования, верифицированные при помощи экспериментальных данных, полученных на модельных горелочных устройствах.

Для достижения технических характеристик, удовлетворяющих растущим требованиям к горелочным устройствам, необходимо решение ряда задач по интенсификации тепломассообмена, достижению равномерного нагрева поверхности, повышению полноты сгорания, лучшего перемешивания топлива и окислителя, повышению диапазона воспламенения и устойчивого горения в значениях числа Рейнольдса (Re) и коэффициента избытка топлива (Φ) и так далее. Для этого используют известные способы управления потоком в зависимости от назначения и конструкции горелочных устройств. Например, организация закрутки потока может турбулизовать поток, существенно интенсифицировать процессы теплообмена и позволяет достичь радиальной однородности нагрева вблизи импактной поверхности по сравнению с незакрученными струями. Во многих промышленных применениях использование закрутки потока успешно используется для повышения устойчивости горения пламени, лучшего перемешивания топлива и окислителя, тепловых характеристик и уменьшения образования вредных выбросов. Однако закрутка потока способствует образованию зон рециркуляции в струе. Помимо закрутки, установка холодной преграды вблизи пламени влияет на процессы горения. Это взаимодействие носит нетривиальный характер, и оно оказывает влияние на особенности химического реагирования и гидродинамику.

Развитие методов численного моделирования и оптических измерений позволяет детально исследовать структуру потока импактного пламени и тепломассообмен между потоком и поверхностью, понять особенности горения вблизи стенки, не возмущая поток, однако таких работ в настоящее время крайне мало. С развитием оптических методов измерений, таких как метод анемометрии по изображениям частиц (англ.: Particle Image Velocimetry, PIV) и метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (англ.: Planar laser-induced fluorescence, PLIF), стали возможны исследования, позволяющие проводить одновременные измерения концентрации веществ, пространственные распределения скорости и температуры в потоке. Благодаря использованию панорамных оптических методов исследований потока стал возможен анализ особенностей химического реагирования и локального тепломассопереноса в сложных трехмерных турбулентных потоках.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния плоской холодной преграды на структуру потока импактной струи с закруткой и горением, на распределение температуры и расположение зоны химического реагирования с использованием оптических методов на основе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) и анемометрии по изображениям частиц.

В рамках поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

- Развитие метода ПЛИФ радикала ОН (метод термической активации) для регистрации поля температуры – численное моделирование спектров с учетом столкновений молекул.
- Апробация метода ПЛИФ радикала ОН на примере ламинарного пламени в форме конуса (конус бунзеновской горелки).
- Исследование режимов горения и особенностей структуры потока для пламени прямоточной струи, натекающей на преграду.
- Исследование влияния преграды на структуру потока и особенности горения турбулентного пламени, стабилизированного закруткой потока.

Научная новизна

- Впервые проведена детальная апробация метода ПЛИФ ОН для измерения поля температуры на основе термической активации.
- Впервые установлено, что размещение холодной преграды напротив бунзеновского пламени приводит к формированию застойной зоны, снижающей интенсивность локального теплообмена в окрестности лобовой точки.
- Впервые установлено, что для пламен, стабилизированных закруткой, при размещении холодной преграды на расстоянии в несколько калибров может возникать дополнительная мода гидродинамической неустойчивости, сопряженная с локальными пульсациями тепловыделения и снижением эффективности сжигания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты апробации метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) на основе термической активации молекул гидроксильного радикала (ОН) для измерения температуры в продуктах горения газовых пламен.

2. Результаты исследования структуры потока для бунзеновского пламени с преградой с использованием панорамных оптических методов измерения поля скорости и температуры. Эффект образования застойной зоны между фронтом пламени и холодной преградой.

3. Результаты исследования пространственной структуры поля мгновенной скорости и формы фронта пламени при горении предварительно перемешанной смеси в импактной струе с закруткой потока. Данные о влиянии плоской холодной преграды на режимы горения, когерентные пульсации скорости и на форму зоны химического реагирования на основе применения метода ПЛИФ ОН и НСНО с использованием метода главных компонент.

Достоверность результатов

Для обеспечения достоверности полученных результатов использовались современные методы, проводились дополнительные поверочные измерения, а также проводился анализ погрешностей и проверка воспроизводимости экспериментальных данных. Методики, используемые в исследовании, были протестированы на других объектах в рамках научной работы, не связанной с темой диссертации, и результаты были сопоставлены с известными работами других научных групп, а также проверены с помощью численного моделирования. Достоверность полученных данных также подтверждается публикацией результатов исследований в строго рецензируемых научных журналах.

Теоретическая и практическая значимость

Полученная в ходе проведения данного исследования база экспериментальных данных значительно расширяет существующие знания о структуре импактных струй с горением. Эти данные могут служить основой для разработки эффективных методов управления теплообменом и горением в различных энергетических установках. Представленные детальные данные о распределениях скорости, температуры и отдельных компонентов продуктов горения обладают большим потенциалом для верификации и апробации численных моделей и различных аналитических подходов, предназначенных для анализа таких типов течений. Реализованные современные оптические методы измерения полей температур, скоростей и распределений радикалов, тщательно верифицированные в работе, могут быть распространены на широкий класс задач теплофизики реагирующих течений.

Методология и методы исследования

В исследовании были применены признанные в мировой практике экспериментальные методы исследования, включая измерение скорости в потоке с помощью метода анемометрии по изображениям частиц (PIV), определение распределения интенсивности флуоресценции гидроксильного радикала и формальдегида с помощью плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ). Для измерения поля температуры были применены методы ПЛИФ ОН на основе термической активации («Thermally-assisted» ПЛИФ) и ПЛИФ ОН для двух линий возбуждения («Two-line» ПЛИФ). Для анализа больших объемов экспериментальных данных использовались методы статистического анализа стохастических динамических систем, такие как метод главных компонент (англ.: Proper Orthogonal Decomposition, POD) и разложение по сингулярным значениям (англ.: Singular Value Decomposition, SVD). Все начальные условия и параметры эксперимента были заданы и контролировались с использованием сертифицированного измерительного оборудования.

Личный вклад автора

Соискатель лично получил научные результаты, которые включены в диссертацию и представлены для защиты. Вклад автора заключался в создании и сборке экспериментальных установок и рабочих участков, проведении всех экспериментов, описанных в работе, разработке и проверке комплекса численных алгоритмов для анализа полученных экспериментальных данных, проведении численного моделирования, а также в обработке и анализе результатов. Автор принимал участие в подготовке статей для публикации в рецензируемых журналах и принимал участие в научных конференциях. Постановка задачи и основные выводы исследования были сформулированы при обсуждении с научным руководителем.

Апробация работы

Результаты исследований неоднократно обсуждались на конференциях: «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» – 2023, «Сибирский Теплофизический Семинар» – 2022, 2021, 2019, «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» – 2021, «Теплофизика и физическая гидродинамика» – 2021, «13-ая Научная конференция отдела горения и взрыва» – 2020, «12-я Научная конференция по горению и взрыву» – 2019, «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» – 2019.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 работ, включая 13 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК. Получен патент РФ № RU 2758869 C1 на изобретение «Способ измерения поля температуры в реагирующих газовых потоках на основе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции гидроксильного радикала».

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 129 страниц с 50 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 140 наименований.

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 дел в исследуемой области. Представлен обзор научных работ, посвященных исследованию импактных струй, в том числе – с горением и с закруткой потока. В литературе преимущественно рассматривают предварительно-перемешанные газовые пламена в диапазоне чисел Рейнольдса (Re) $500 \div 10000$, коэффициентов избытка топлива (Φ) $0.6 \div 1.5$ (чаще бедное горение или близкое к стехиометрии), чисел закрутки (S) $0.3 \div 1$ и при относительно небольших значениях H/d $0.5 \div 5$ (отношение расстояния между соплом и поверхностью и диаметром сопла), при которых наблюдается влияние поверхности на пламя. Из обзора литературы было установлено, что большинство исследований направлены на визуализацию режимов горения и сопоставление формы пламени с распределением коэффициента теплоотдачи. Однако количественные данные о структуре потока импактных струй с горением и по особенностям химического реагирования в пристенной области практически отсутствуют в литературе.

Во **второй главе** представлено описание используемых методик измерения, экспериментальных стендов, представлены результаты численного моделирования спектров флуоресценции ОН, приведено сравнение результатов измерения поля температуры в бунзеновском конусе, в качестве примера представлены результаты оценки поля температуры в газокапельном пламени. В экспериментах была использована модельная конфигурация натекающей струи на преграду, позволяющая проводить измерения различных параметров с использованием оптических методов, – это одиночная круглая струя с горением, перпендикулярно натекающая на плоскую поверхность. Экспериментальный стенд (рисунок 1) включал в себя профилированное осесимметричное сужающееся сопло (с внутренним диаметром $d=15$ мм). Закрутка потока осуществлялась с помощью лопастных завихрителей

различной геометрии, которые обеспечивали разную степень закрутки потока S (S – отношение аксиального потока момента импульса к аксиальному потоку импульса, число закрутки определялось по геометрическим параметрам завихрителей [1]). В работе были использованы два различных завихрителя, соответствующих $S=0.41$, «слабой» закрутке, и $S=1$, «сильной» закрутке. Для организации импактного горения над пламенем устанавливался металлический цилиндрический сосуд (с внешним диаметром 300 мм), внутри которого циркулировала вода. Температура импактной поверхности поддерживалась постоянной с помощью термостата (96°C). Во всех экспериментах использовалась предварительно перемешанная смесь воздуха с различными видами топлива: метан, пропан, пары и капли этанола.



Рисунок 1. Фотографии экспериментальной установки.

При помощи метода ПЛИФ производилась регистрации сигнала флуоресценции НСНО и ОН с использованием цифровых камер с электронно-оптическими преобразователями, кварцевыми объективами и оптическими фильтрами. Для возбуждения флуоресценции использовались импульсные лазеры накачки и перестраиваемые лазеры на красителях. Для измерения поля скорости использовался метод анемометрии по изображениям частиц в стереоскопической конфигурации. Значение коэффициента избытка топлива (Φ) в работе варьировалось в диапазоне от 0.7 до 2.5, число Рейнольдса (Re) в диапазоне от 1000 до 5000. В главе описаны основные алгоритмы обработки изображений, полученных методами PIV и ПЛИФ. Проведена оценка погрешностей методов. Главным лимитирующим фактором для используемых в работе методов выступает пространственное разрешение, связанное с толщиной лазерного «ножа».

В главе приведено описание основных принципов работы методов PIV и ПЛИФ, описаны принципы работы двух подходов к получению полей температуры в пламени: «Two-line» ПЛИФ и «Thermally-assisted» ПЛИФ. Метод ПЛИФ основан на регистрации изображений интенсивности флуоресценции молекул, электронно-возбужденных в выбранной плоскости

потока с использованием лазерного излучения. Интенсивность флуоресценции I_{LIF} , возбуждаемой лазером, линейно зависит от интенсивности лазерного излучения I_{LASER} в случае флуоресценции без насыщения. Кроме того, присутствует зависимость от счетной концентрации молекул в объеме $N(p,T)$, населенности уровня, с которого происходит возбуждение $f(T)$ (функция распределения Больцмана), коэффициента Эйнштейна для поглощения B_{ik} , квантового выхода флуоресценции ϕ и спектрального перекрытия линий возбуждения и поглощения $\Gamma(p,T)$. Квантовый выход флуоресценции ϕ определяется отношением вероятности спонтанного излучения с верхнего уровня к полной вероятности процессов релаксации, которая включает излучательные и безызлучательные переходы. Зависимости выражаются формулами (1), где A_{kj} – коэффициенты Эйнштейна, $P_k(p,T)$ – скорость тушения в результате безызлучательных переходов, R_k – скорость преддиссоциации:

$$I_{LIF} = I_{LASER} N(p,T) f(T) B_{ik} \Gamma(p,T) \phi, \quad \phi = \frac{A_{ki}}{\sum_j A_{kj} + P_k(p,T) + R_k}. \quad (1)$$

Метод ПЛИФ при возбуждении двух различных начальных состояний молекул ОН («Two-line») основан на возбуждении линий $Q_1(5)$ (282.67 нм) и $Q_1(14)$ (286.37 нм) перехода $(1-0)$ электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ с последующей регистрацией сигнала флуоресценции переходов $(0-0)$ и $(1-1)$ (300–320 нм). Выбор пары линий возбуждения $Q_1(5):Q_1(14)$ подробно описан в [2]. Отношение интенсивности сигналов флуоресценции переходов $(0-0)$ и $(1-1)$ при возбуждении разными линиями соотносится с температурой в соответствии с населенностью энергетических уровней по распределению Больцмана [3].

Используемый в работе метод «Thermally-assisted» ПЛИФ, или метод термической активации молекул ОН, основан на возбуждении линии $Q_1(8)$ перехода $(1-0)$ электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ с последующей регистрацией сигнала флуоресценции (с использованием двух камер) перехода $(2-0)$ (I_1) и переходов $(1-1)$, $(0-0)$ (I_2). Для пересчета отношения сигналов в температуру была проведена калибровка измерительной системы на ламинарном пламени в форме конуса с использованием термопары типа В (ТПР). После измерения температуры в пламени с помощью термопары в нескольких сечениях была построена калибровочная кривая, которая позволяет соотнести значение отношения I_1 и I_2 к температуре в пламени.

В главе представлены результаты численного моделирования спектра флуоресценции ЛИФ ОН с учетом обмена энергией в процессе столкновений с использованием программного пакета LASKIN, который позволяет

моделировать спектры с разрешением по времени и длине волны для нескольких видов молекул и включает в себя широкий спектр настройки экспериментальных условий. В программе возможен учет процессов тушения, вызванных столкновением, перераспределения молекул по энергии колебательных и вращательных состояний, диссоциации, спонтанного излучения.

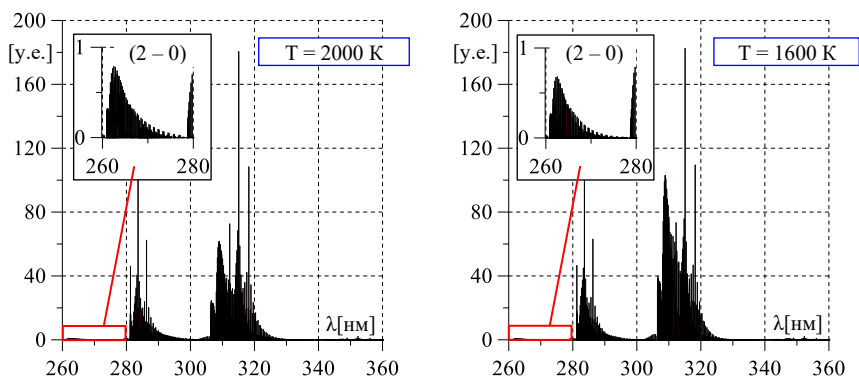


Рисунок 2. Спектр флуоресценции ОН при возбуждении перехода $Q_1(8)$ полосы (1–0) для разных температур.

Полученные при численном моделировании данные представляют собой набор спектров флуоресценции ОН при возбуждении переходов $Q_2(7)$, $Q_1(8)$, $R_1(14)$, $P_1(2)$ полосы (1–0) системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ для сравнения между собой, с работами других авторов, для определения параметров эксперимента в случае метода термической активации ПЛИФ, а также для валидации метода «Two-line» ПЛИФ. Показаны зависимости значений интенсивности флуоресценции от выбранных линий возбуждения, температуры, спектральных диапазонов регистрации. Для всех моделируемых спектров флуоресценции ОН состав газа моделировал состав продуктов горения пламени стехиометрической метановоздушной смеси ($\Phi=1$) и соответствовал следующим молярным долям: N_2 –72%, H_2O –18%, CO_2 –9%, ОН–1%. Параметры возбуждающего излучения, давления и температуры были аналогичны реальным параметрам в эксперименте. Для каждой линии возбуждения моделирование было проведено для различных значений температуры: от $T=1000$ К до $T=2200$ К с шагом в 200 К.

На рисунке 2 представлен смоделированный спектр флуоресценции (проинтегрированный по времени) для случая возбуждения перехода $Q_1(8)$ полосы (1–0) системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ для двух различных температур. Из-за

увеличения населенности верхних состояний в результате столкновения молекул интенсивность флуоресценции перехода (2–0) растет практически во всем диапазоне температур, рассматриваемом при моделировании, а интенсивность флуоресценции для переходов (0–0) и (1–1) (300–320 нм) падает с увеличением температуры. Показано, что отношение интенсивности этих полос увеличивается для всего диапазона температур (Рисунок 3А и 3Б).

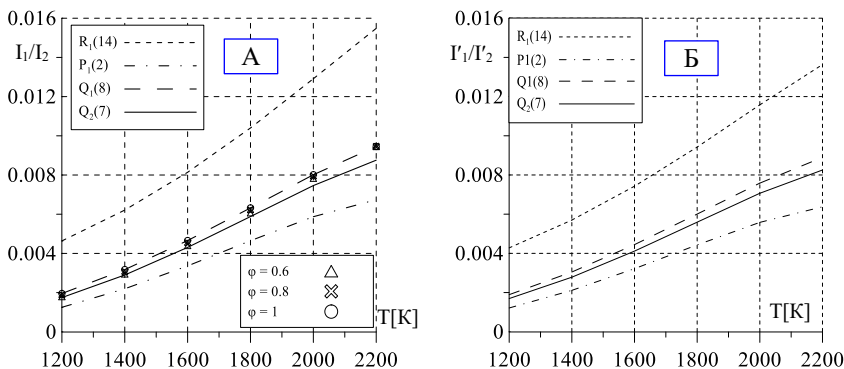


Рисунок 3. Отношение интегральной интенсивности флуоресценции ОН (А) для диапазонов спектра 260–270 нм (I_1) к 300–320 нм (I_2) и (Б) для полос (2–0) (I'_1) и (0–0)+(1–1) (I'_2) при возбуждении различных переходов в зависимости от температуры. (А) Зависимость отношения I_1/I_2 при возбуждении перехода $Q_1(8)$ при различных Φ .

На рисунке 3А представлено отношение интегрированной интенсивности флуоресценции для диапазонов спектра 260–270 нм (I_1) и 300–320 нм (I_2). Исследуемые области спектра регистрировались камерами в ходе эксперимента, выделяя регистрируемый сигнал с помощью оптических фильтров. Поскольку разница между отношением интенсивности I_1/I_2 (рисунок 3А) и I'_1/I'_2 (рисунок 3Б) равна приблизительно 5%, то можно считать выбор фильтров (диапазон длин волн) корректным. Из всех протестированных линий возбуждений, линия $Q_1(8)$ обладает наибольшей чувствительностью к температуре (для линии $Q_1(8)$ достигается максимальное значение производной по температуре). По данной причине линия возбуждения $Q_1(8)$ была использована в эксперименте. На рисунке 3А представлена зависимость отношения I_1/I_2 при возбуждении перехода $Q_1(8)$ при различных значениях Φ . Из представленных результатов видно, что эффект влияния тушения флуоресценции кислородом на отношение интенсивностей незначителен.

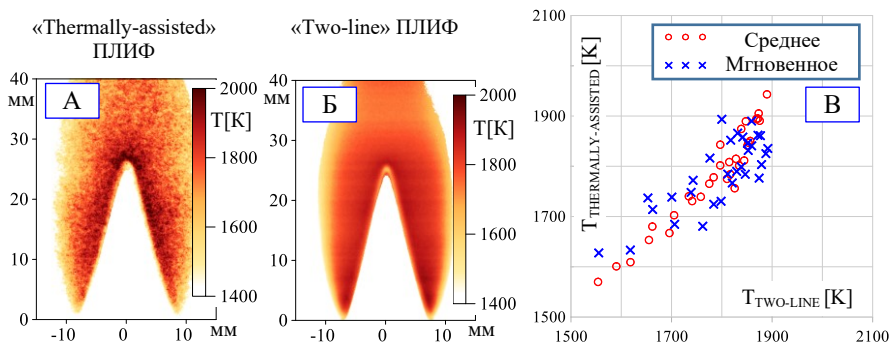


Рисунок 4. А и Б – реализации поля средней температуры, полученные двумя методами ПЛИФ ОН. В – сравнение оценки температуры для двух методов ПЛИФ.

В главе представлено сравнение результатов измерений поля температуры методами «Thermally-assisted» ПЛИФ (рисунок 4А) и «Two-line» ПЛИФ (рисунок 4Б) в открытом пламени Бунзена при $Re=1000$, $\Phi=0.92$ (топливо – метан). Поля температуры, полученные двумя представленными методами, имеют близкие значения с $SKO \approx 75K$ (рисунок 4В). На рисунке 5 представлены результаты (взяты из работы [4]) измерения температуры с

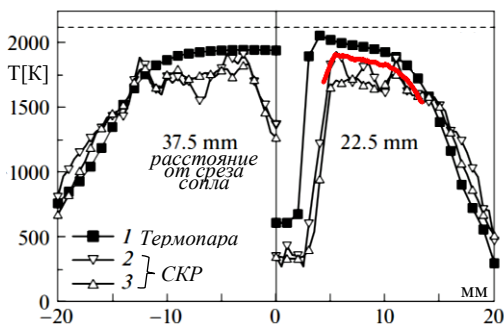


Рисунок 5. Сравнение профилей температуры работы [4] с результатами настоящего исследования. Красная линия – профиль температуры, полученный в данной работе методом «Two-line» ПЛИФ.

помощью термопары и методом спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) в пламени предварительно-перемешанной метановоздушной смеси при $\Phi=0.92$. На рисунок 5 был наложен профиль температуры (красными точками), полученный в данной работе методом «Two-line» ПЛИФ в геометрически близком положении (в сечении равном $\frac{1}{2}$ высоты конуса). Результаты данной работы лучше всего соотносятся с данными, полученными СКР по отношению сигнала стоксовского пика к антистоксовому пику.

В качестве примера, в главе представлены результаты оценки поля температуры методом «Two-line» ПЛИФ в нестационарном двухфазном

потоке при $Re=1000$, $\Phi_{total}=1.2$ и 1.47 , где в качестве топлива были использованы пары и капли спирта. Также в главе представлены примеры отношения мгновенных ПЛИФ сигналов двух линий $Q_1(5)$ и $Q_1(14)$ и распределения мгновенной температуры для двух значений Φ . В газокapelном пламени затруднительно реализовать метод «Thermally-assisted» ПЛИФ, поскольку высокая интенсивность регистрируемого сигнала от рассеяния на каплях топлива в области длин волн $260\text{--}270$ нм (соответствует переходу $(2\text{--}0)$ со слабым собственным сигналом флуоресценции) способна повредить матрицу регистрирующей камеры. Распределения температуры не показывают существенного влияния поглощения лазерного излучения вдоль оси распространения лазерного «ножа». Однако, исходя из полученных профилей и поля температуры, в подходе «Two-line» ПЛИФ необходимо компенсировать неравномерности распределения интенсивности «ножа» для двух разных лазеров и камер, что весьма затруднительно с технической точки зрения. Таким образом, применение метода оценки температуры «Two-line» ПЛИФ в нестационарных потоках технически сложно реализуемо.

В третьей главе представлено описание измерительной системы, используемой для реализации метода PIV. Также представлены результаты визуализации некоторых режимов горения импактного пламени, наблюдаемых при варьировании Re , Φ и H/d . Для визуализированных режимов определены линии срыва пламени. Представлены результаты измерений поля скорости, полученные с помощью метода PIV, представлены результаты измерений поля температуры, полученные с помощью методов «Two-line» ПЛИФ и «Thermally-assisted» ПЛИФ в ламинарном импактном пламени.

На рисунке 6 представлены распределения средней скорости потока с горением для $Re=1700$, $\Phi=0.9$ (топливо – пропан) и расстояний $H/d=1, 2, 3$ и 4 . Для $H/d=1$ конус деформирован вследствие наличия градиента давления в окрестности лобовой точки. Как можно видеть из распределения осевой скорости, представленной на рисунке 7 в координатах относительно стенки ($y^*=H-y$), влияние преграды приводит к монотонному уменьшению скорости потока уже с самой кромки сопла. Локальный максимум осевой скорости потока вблизи импактной поверхности вызван наличием фронта пламени. Как можно видеть из распределения осевой скорости, она достигает отрицательных значений в случае $H/d=3$ и 4 , что соответствует наличию возвратного течения на оси струи вблизи преграды. Области с отрицательными значениями осевой скорости визуализированы сплошной красной линией на поле скорости на рисунке 6.

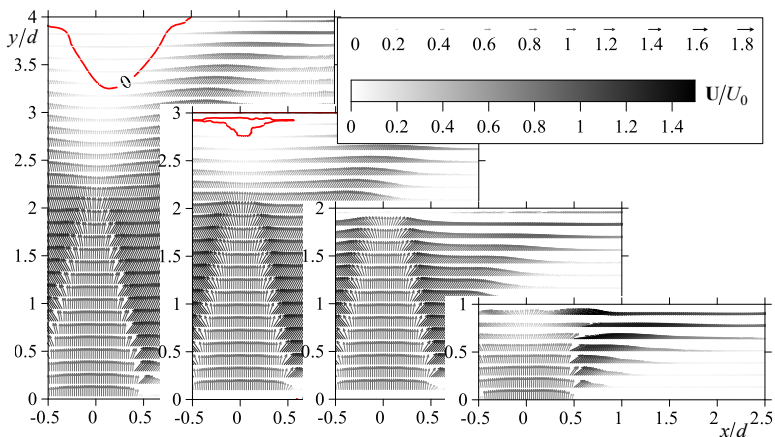


Рисунок 6. Поле средней скорости импактной струи с горением пропановоздушной смеси, $Re=1700$, $\Phi=0.9$.

В работе предложен механизм возникновения возвратного течения: при натекании струи на преграду давление достигает максимального значения в лобовой точке, что соответствует отрицательному градиенту давления в радиальном направлении. Это приводит к возникновению центростремительной объемной силы, действующей на охлажденный в пристенной области газ, уменьшая его продольную скорость и снижая эффективность теплообмена. В окрестности лобовой точки может также возникать область возвратного течения, где концентрируются охлажденные продукты горения, которые способствуют снижению эффективности локального теплообмена между струей и преградой.

В работе представлены реализации поля средней температуры для метановоздушного пламени при $Re=1000$, $\Phi=0.92$, $H/d=1, 2, 3$, полученные с помощью методов «Two-line» ПЛИФ и «Thermally-assisted» ПЛИФ. На рисунке 8 представлен случай $H/d=3$ (температура определена только в тех областях, где регистрируется сигнал флуоресценции ОН). Максимальная

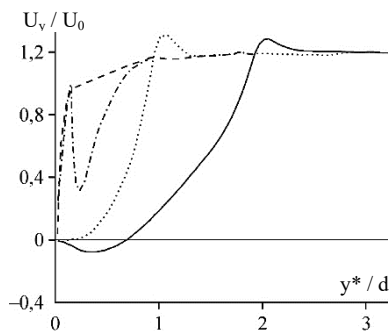


Рисунок 7. Распределение средней скорости на оси струи ($x=0$, на оси абсцисс поля скорости).

температура в пламени наблюдается в зоне за фронтом пламени в области горячих продуктов горения.

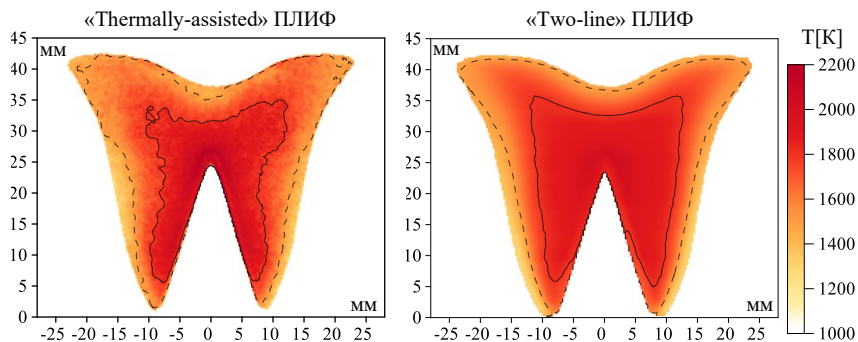


Рисунок 8. Реализации поля средней температуры, полученные с помощью термометрии на основе ПЛИФ ОН для режима $\Phi=0.92$ (топливо – метан), $Re=1000$, $H/d=3$. Изолинии: пунктирная – 1500 K, сплошная – 1800 K.

Установлено, что температура вблизи фронта пламени для всех случаев расстояний сопоставима с температурой вблизи фронта пламени для свободного бунзеновского пламени. Для случая $H/d=1$ наблюдается пониженная температура (относительно других случаев), что связано с отводом тепла к поверхности и уменьшением площади фронта пламени. Оценка поля температуры в случае $H/d=1$ методом «Thermally-assisted» ПЛИФ затруднена ввиду заметного вклада сигнала от отражений лазерного излучения на поверхности в полезный сигнал.

На рисунке 9 представлены профили температуры из полей температуры, полученные для импактного пламени методом «Two-line» ПЛИФ в сечении, перпендикулярном к пластине, при $x = 9.5$ мм от центра сопла для трех различных значений H/d . По оси ординат отмечено расстояние от кромки сопла до поверхности, с $y = 0$ на кромке сопла. Полученные данные указывают на то, что при появлении препятствия на пути распространения пламени вблизи импактной поверхности для случая $H/d=3$ возникает зона обратного течения с холодными продуктами горения, которые могут способствовать

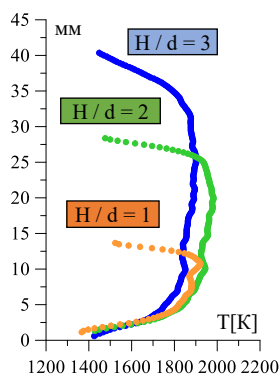


Рисунок 9. Профили температуры в сечении $x=9.5$ мм от центра сопла для трех различных значений H/d .

снижению локального теплообмена между факелом и преградой. В связи с чем определение температуры в случае $H/d=3$ с помощью методов термометрии на основе ПЛИФ ОН затруднено вблизи точки соударения из-за охлаждения молекул ОН поверхностью. Полученные данные могут объяснять данный эффект пониженных значений теплового потока вблизи точки соударения с поверхностью, полученный в работе [5].

В четвертой главе представлено описание измерительной ПЛИФ системы, используемой при одновременной регистрации полей скорости и регистрации распределения сигнала флуоресценции НСНО и ОН. Приведена визуализация режимов горения импактного турбулентного закрученного пламени смеси при $Re=5000$, $\Phi=0.7$, 1, 1.4, 2.5 (топливо – пропан), $H/d=4, 3, 2, 1$. Визуализация характерных режимов горения показала, что размещение холодной преграды напротив закрученного пламени принципиально не меняет режимы горения. В работе сделан акцент на измерениях поля скорости и распределения сигнала флуоресценции НСНО и ОН в случае $S=1$ при $\Phi=0.7$, поскольку данный режим горения способствует меньшему образованию загрязняющих веществ и сажи, а также обладает более равномерным нагревом поверхности, согласно обзору литературы. На рисунке 10 представлены фотографии исследуемых режимов.

В работе представлены результаты измерений поля скорости в импактной струе с горением при $Re=5000$, $\Phi=0.7$ (топливо – пропан) и $H/d=1, 2, 3$, параметре крутки $S=0.41$ и 1 (на рисунке 11 представлены реализации поля средней скорости для случаев $H/d=1$ и 3). В работе также представлена интенсивность сигнала флуоресценции формальдегида и гидроксильного радикала, осредненная по времени, для вышеперечисленных режимов горения.

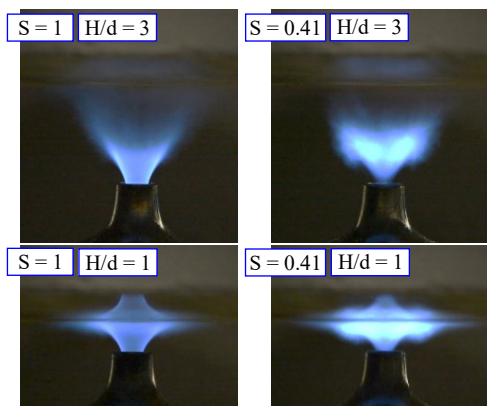


Рисунок 10. Фотографии импактного закрученного пламени при $Re=5000$, $\Phi=0.7$ (топливо – пропан), $H/d=1, 3$ и $S=0.41$ и 1.

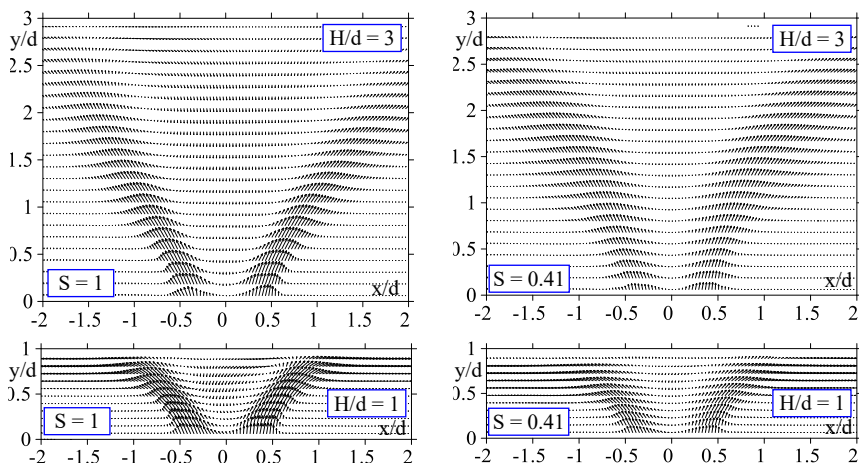


Рисунок 11. Реализации поля средней скорости. Предварительно перемешанная пропановоздушная смесь, $Re=5000$, $\Phi=0.7$.

Для двух значений закрутки при $H/d=3, 2, 1$ присутствует центральная зона рециркуляции в виде перевернутого конуса. Из обзора литературы и предыдущих исследований автора известно, что аналогичная ситуация в случае сильной закрутки наблюдается для импактной струи без горения. Наличие импактной поверхности увеличивает объем зоны рециркуляции по сравнению со свободной струей. В случае отсутствия поверхности при сильной закрутке зона рециркуляции имеет форму пузыря. Для случая слабой закрутки осевая скорость потока также снижается в результате расширения струи, но остается положительной, в том числе и в случае горения. Размещение же преграды для рассмотренных расстояний приводит к формированию протяженной конусообразной зоны рециркуляции, расположенной между импактной поверхностью и соплом. В обоих случаях закрутки зона рециркуляции проникает в сопло.

В работе также приложены осреднённые данные ПЛИФ измерений, демонстрирующие, что размещение преграды приводит к значительной интенсивности люминесценции НСНО в пристенной области и для некоторых режимов в зоне рециркуляции. Эти данные свидетельствуют о том, что холодная преграда оказывает влияние в том числе и на процессы горения в основании пламени вблизи горелки, вследствие теплообмена между продуктами горения в протяженной зоне рециркуляции и смесью, поступающей из сопла.

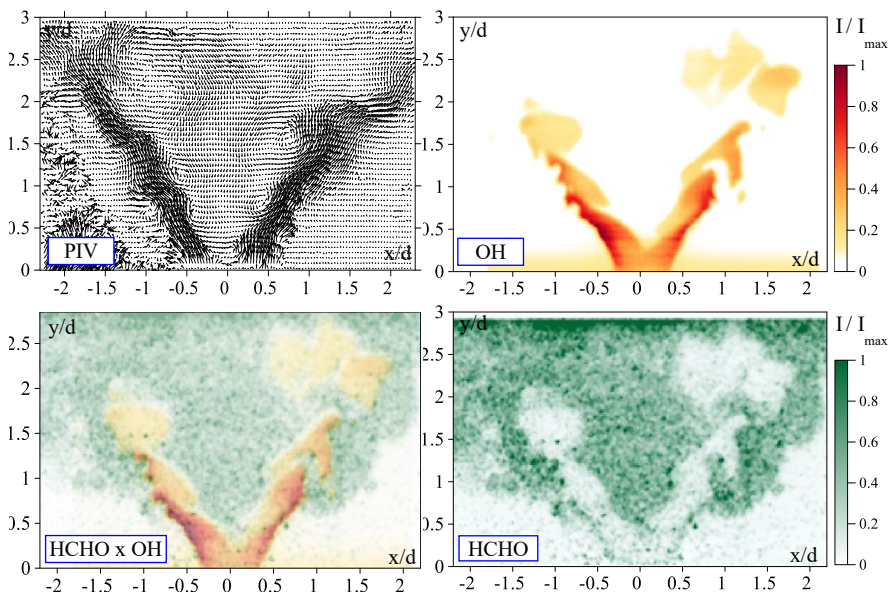


Рисунок 12. Поле мгновенной скорости, мгновенное распределение интенсивности сигнала флуоресценции HCHO и OH , наложение сигналов OH и HCHO , $H/d=3$, $Re=5000$, $\Phi=0.7$ (топливо – пропан), $S=1$.

В работе представлены мгновенные реализации поля скорости импактной струи с горением при числе Рейнольдса $Re=5000$, коэффициенте избытка топлива $\Phi=0.7$ (топливо – пропан) и $H/d=1$ и 3 , параметре крутки $S=0.41$ и 1 , представлено мгновенное распределение интенсивности сигнала флуоресценции HCHO и OH при тех же параметрах. В качестве примера на рисунке 12 представлены поля мгновенной скорости для $S=1$, $H/d=3$, мгновенные распределения интенсивности сигнала флуоресценции HCHO и OH , а также наложение сигналов HCHO и OH для качественного определения зоны максимального тепловыделения.

Установлено, что фронт пламени для сильной закрутки расположен преимущественно во внешнем и внутреннем слоях смешения вблизи сопла, для слабой – преимущественно внутри зоны рециркуляции вблизи сопла. На мгновенных изображениях поля скорости наблюдается наличие крупных вихревых структур, обеспечивающих теплообмен между продуктами горения и свежей смесью, поступающей из сопла, а также деформирующих фронт пламени. Для расстояния $H/d=3$ впервые обнаружено значительное увеличение интенсивности сигнала флуоресценции HCHO (и, как и

ожидалось, более сложных органических соединений – продуктов неполного сгорания) вблизи поверхности и внутри центральной зоны рециркуляции. Этот эффект можно объяснить охлаждением потока у поверхности и, как следствие, снижением температуры внутри рециркуляционной зоны. Можно ожидать, что этот эффект приводит к снижению полноты сгорания топлива и увеличению концентрации загрязняющих веществ в продуктах сгорания (в частности, формальдегида), что требует дальнейшего изучения.

В главе представлены результаты применения метода главных компонент (POD) для анализа полученных массивов данных, а именно пространственные распределения мод POD и соответствующие им осредненные по фазе пульсации интенсивности HCHO и OH . Метод POD основан на пространственно-временной декомпозиции данных на набор ортогональных пространственных функций, называемых модами. Данные моды представляют собой линейную суперпозицию полей пульсаций скорости, коэффициенты которой определяются на основе решения задачи на собственные значения ковариационной матрицы. Используя метод POD, можно выделить основные структуры, идентифицировать доминирующие моды и оценить их влияние на рассматриваемые процессы. Метод позволяет исследовать взаимодействия между различными частями течения, выделить доминирующие моды и понять основные физические механизмы, ответственные за эволюцию турбулентного течения.

В главе представлены результаты анализа турбулентного пламени, направленного на преграду для $\text{Re}=5000$, $\Phi=0.7$, $H/d=1$ и 3 , $S=1$, с помощью POD. Чтобы охарактеризовать когерентные структуры потока, наборы данных, полученные методами PIV и ПЛИФ, были обработаны с помощью POD с применением метода разложения по сингулярным значениям (Singular Value Decomposition, SVD) матрицы данных $U=[\mathbf{u}'(\mathbf{x}, t_1) \dots \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t_N)]$, где $\mathbf{u}'(\mathbf{x}, t_i)$ – поле пульсаций скорости в момент времени t_i :

$$\mathbf{U} = \mathbf{W}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad \text{или} \quad \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t_k) = \sum_{q=1}^N \alpha_q(t_k) \sigma_q \boldsymbol{\varphi}_q(\mathbf{x}). \quad (2)$$

где $\mathbf{W}$ – матрица пространственных мод (левосингулярных векторов), $\mathbf{V}^T$ – матрица временных амплитуд (правосингулярных векторов), $\mathbf{\Sigma}$ – диагональная матрица сингулярных чисел. Сингулярные значения характеризуют амплитуду (квадратный корень из кинетической энергии пульсаций скорости) каждой моды и расположены на диагонали матрицы в порядке убывания. Множество полей пульсаций скорости $[\mathbf{u}'(\mathbf{x}, t_1) \dots \mathbf{u}'(\mathbf{x}, t_N)]$ представляется в виде конечного ряда произведений пространственных ортонормированных базисных функций $\boldsymbol{\varphi}_q$ с безразмерными временными коэффициентами α_q и

сингулярными значениями σ_q . Моды POD и временные коэффициенты ортонормированы. Поля пульсации концентрации примеси $C=[c'(x, t_1) \dots c'(x, t_N)]$ можно усреднить по фазе для получения когерентных пульсаций сигнала [6]. В работе установлено, что наибольший вклад в энергию пульсаций вносят первые четыре моды для каждого H/d . В работе представлены пространственные распределения первых четырех мод POD и соответствующие ей осредненные по фазе пульсации интенсивности сигналов НСНО и ОН для $Re=5000$, $\Phi=0.7$, $H/d=1$ и 3 , $S=1$. На рисунке 13 представлены первая и вторая моды для случая $H/d=3$. Цвет шкалы на графиках соответствует усредненному по фазе значению пульсаций интенсивности концентраций $[OH] \times [НСНО]$. Эти данные получены в областях пересечения сигналов люминесценции ОН и НСНО, где имеет место наибольшее тепловыделение [6].

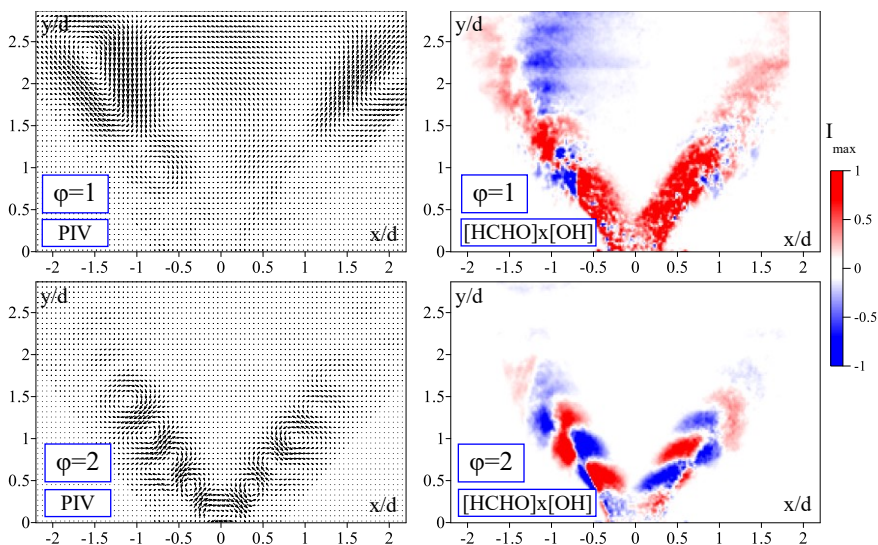


Рисунок 13. Пространственные распределения первых двух мод ($\varphi=1$ и 2) POD и соответствующие ей осредненные по фазе пульсации интенсивности пересечения сигналов НСНО и ОН для $Re=5000$, $\Phi=0.7$, $H/d=3$, $S=1$.

Обнаружено, что POD моды соответствуют двум разным типам когерентных структур. В случае $H/d=1$ первые четыре моды соответствуют крупномасштабным вихревым структурам, формирующимся в слоях смещения струи. В случае $H/d=3$ вторая и третья POD моды также соответствуют крупномасштабным вихревым структурам. Судя по

усредненной по фазе интенсивности флуоресценции, эти моды вызывают деформации зоны химической реакции. Первая и четвертая моды РОД соответствует крупномасштабным колебаниям потока при натекании струи на поверхность. Судя по усредненным по фазе пульсациям сигнала НСНО ПЛИФ, эти крупномасштабные движения потока статистически коррелируют с изменением интенсивности НСНО внутри центральной зоны рециркуляции.

Мода пульсации интенсивности НСНО в случае $H/d=3$, обнаруженная впервые, обладает большим размером (порядка 2 калибров в обоих сечениях) и находится вне зоны спиралевидных вихрей, дальше по потоку, вблизи поверхности и внутри зоны рециркуляции. При малых расстояниях $H/d=1$ данная мода не наблюдается. Можно отметить, что в случае пересечения сигналов интенсивности НСНО и ОН зона максимального тепловыделения вблизи сопла также имеет пульсационную составляющую. Данное наблюдение требует дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения экспериментального исследования в настоящей работе были получены данные о влиянии плоской холодной преграды на структуру потока импактной струи с горением, распределение температуры и на особенности химического реагирования (расположение зон химических реакций) с использованием оптических методов на основе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (ПЛИФ) и анемометрии по изображениям частиц.

При апробации метода термической активации ПЛИФ ОН («Thermally-assisted» ПЛИФ) в ходе проведения численного моделирования было установлено, что для термически активированного ПЛИФ возбуждение полосы $(1-0)$ системы $A^2\Sigma^+-X^2\Pi$ на длине волны перехода $Q_1(8)$ позволяет добиться максимальной чувствительности к температуре. Также установлено, что влияние тушения флуоресценции кислородом незначительно. Сравнение используемых методов оценки поля температуры в работе, а именно методов «Two-line» ПЛИФ и «Thermally-assisted» ПЛИФ, в стационарных условиях демонстрирует хорошее соответствие между собой с СКО $\approx 75K$. В ходе измерений поля температуры для нестационарного пламени применение метода «Two-line» ПЛИФ является технически более сложным. Применение термически активированного ПЛИФ («Thermally-assisted») позволяет выполнить оценку распределения поля температуры за одну вспышку лазера.

На основе измеренного поля скорости в потоке бунзеновского конусного пламени впервые было установлено, что размещение холодной преграды на расстоянии в три и четыре калибра приводит к формированию зоны рециркуляции вблизи преграды. Полученные оценки поля температуры

методами ПЛИФ подтверждают данный эффект, обнаруженный впервые, и объясняют описанные в литературе данные о снижении интенсивности локального теплообмена в окрестности лобовой точки для данных расстояний.

При исследовании структуры потока и режимов горения закрученных пламен установлено, что размещение холодной преграды принципиально не меняет режимы горения. Однако проведенные измерения поля скорости для режимов горения предварительно перемешанной смеси показали, что при наличии преграды зона рециркуляции принимает форму протяженного конуса между соплом и преградой как при сильной, так и при слабой степени закрутки. Более того, установлено, что наличие преграды может приводить к проявлению моды гидродинамической неустойчивости, не наблюдавшейся в случае открытого пламени. Данная мода сопряжена с пульсациями скорости в продольном направлении, коррелирующими с пульсациями тепловыделения вблизи сопла и повышенной концентрацией несгоревших углеводородов вблизи преграды.

Используемая литература:

1. Гупта А. и др. Закрученные потоки. – Москва : Мир, 1987. – 588 С.
2. Lobasov A.S. et al. On the efficiency of using different excitation lines of (1-0) two-line OH fluorescence for planar thermometry // *Thermophys. Aeromechanics*. – 2021. – Vol. 28, № 5. – P. 751–755.
3. Devillers R. et al. Development of a two-line OH-laser-induced fluorescence thermometry diagnostics strategy for gas-phase temperature measurements in engines // *Appl. Opt.* – 2008. – Vol. 47, № 31. – P. 5871–5885.
4. Sharaborin D.K. et al. Planar Spontaneous Raman Scattering Spectroscopy for Reacting Jet-Flow Diagnostics Using Lyot–Ehman Tunable Filter // *Tech. Phys. Lett.* – 2018. – Vol. 44. – P. 53–56.
5. Chander S. et al. Experimental and numerical study on the occurrence of off-stagnation peak in heat flux for laminar methane/air flame impinging on a flat surface // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2011. – Vol. 54, № 5–6. – P. 1179–1186.
6. Lobasov A.S., Alekseenko S.V., Markovich D.M., Dulin V.M. Mass and momentum transport in the near field of swirling turbulent jets. Effect of swirl rate // *Int. J. Heat Fluid Flow*. – 2020. – Vol. 83. – P. 108539.

Основные результаты диссертации представлены в 18 работах, включая один патент на изобретение, 14 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Dulin V.M., Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the A2 ζ +X2П (1-0) band // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2021. – V. 38, №1. – P. 1877–1883. (из перечня ВАК)

2. Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V., Dulin V.M. Markovich D.M., On the Structure of an Impact Jet with Flow Swirling and Combustion // Combustion, Explosion and Shock Waves. – 2020. – V. 56. – P. 131–136. (из перечня ВАК)
3. Kravtsov Z.D., Tolstoguzov R.V., Chikishev L.M., Dulin V.M. On formation of a stagnation zone in the flow between conical flame and flat obstacle // Thermophysics and Aeromechanics. – 2018. – V. 25, № 2. – P. 317–320. (из перечня ВАК)
4. Шараборин Д.К., Толстогузов Р.В., Дулин В.М., Маркович Д.М. О режимах горения в закрученной струе, направленной на плоскую преграду // Горение и взрыв. – 2019. – Т. 12, №2. – С. 60–67. (из перечня ВАК)
5. 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. (из перечня ВАК)
6. Sharaborin D.K., Lobasov A.S., Tolstoguzov R.V., Dulin V.M. Temperature measurement in a bunsen gas–droplet flame of ethanol using OH PLIF // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2022. – V. 58, №5. – P. 507–515. (из перечня ВАК)
7. Патент на изобретение № 2758869 Российская Федерация, МПК G01K 13/02, МПК G01N 21/64. Способ измерения поля температуры в реагирующих газовых потоках на основе плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции гидроксильного радикала: заявл. 30.09.2020, опубл. 02.11.2020 / Маркович Д. М., Дулин В. М., Шараборин Д. К., Толстогузов Р. В., Лобасов А. С., Чикишев Л. М.
8. 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. – V. 754. – № 072001. (из перечня ВАК)
9. Sharaborin D.K., Tolstoguzov R.V. Structure of a reacting flow of a turbulent swirling jet during combustion of a syngas–air mixture // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1382. – № 012066. (из перечня ВАК)
10. Tolstoguzov R.V., Sharaborin D.K. On combustion regimes of syngas-air and methane-air lean flames for swirl-stabilized burners // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1382. – № 012067. (из перечня ВАК)
11. Tolstoguzov R.V., Sharaborin D.K. Coherent Structures in an Impinging Jet With Swirl and Combustion // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2211. – № 040004. (из перечня ВАК)
12. Дулин В. М., Шараборин Д. К., Толстогузов Р. В., Лобасов А. С., Чикишев Л. М., Маркович Д. М. Применение плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции для термометрии в камере сгорания с закруткой потока // Горение и взрыв. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 8–18. (из перечня ВАК)
13. Tolstoguzov R.V. Temperature measurements in a Bunsen flame by planar laser induced fluorescence // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1677(1). – № 012045.
14. Tolstoguzov R. V. Temperature measurements in a swirling impinging flame by planar laser-induced fluorescence // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2119. – № 012042. (из перечня ВАК)
15. 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. – № 012014. (из перечня ВАК)

16. Толстогузов Р.В. Измерение поля температуры в ламинарном пламени на основе ЛИФ гидроксильного радикала // Сборник трудов всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар». – 2022. – С. 308–311.
17. Савицкий А.Г., Толстогузов Р.В. Измерение поля температуры турбулентного закрученного пламени в вихревой камере сгорания методом лазерно-индуцированной флуоресценции // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». – 2023. – С. 112–116.
18. Толстогузов Р.В., Савицкий А.Г., Измерение поля температуры в пламенах различной конфигурации с помощью метода ЛИФ // Сборник трудов XVII Всероссийской школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». – 2023. – С. 151–155.