



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЦЕНТР ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

им. Н.Н. Семенова  
Российской академии наук  
(ФИЦ ХФ РАН)

119991 г. Москва, ул. Косыгина, д. 4  
Телефон: (499)137-29-51; Факс: (495) 651-21-91

E-mail: [icp@chph.ras.ru](mailto:icp@chph.ras.ru)

09.12.2022 № 68-03/1571

На № \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ФИЦ ХФ РАН по  
научной работе

д. ф. м. н. Гришин М. В.

12

2022

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный  
исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии  
наук

на диссертационную работу Чикишева Леонида Михайловича  
«Физическое моделирование процессов переноса в камерах сгорания с закруткой потока»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа Чикишева Л.М. посвящена исследованию 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. Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью создания и развития современной отечественной газотурбинной техники, работающей по принципу сжигания «обедненной» топливовоздушной смеси (с избытком воздуха). Развитие данной технологии связано с решением ряда проблем, а именно: стабилизацией пламени вблизи бедного среза, предотвращением возникновения режимов вибрационного горения и проскока пламени. На практике разработчики газотурбинного оборудования используют подходы, основанные на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу в стационарной и нестационарной постановке, что требует 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. Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, **актуальна** и имеет большую практическую значимость.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертационная работа Чикишева Л.М. характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка использованной литературы. Диссертация изложена на 151 странице, включает 84 рисунка, библиографический список литературы включает 158 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой темы, сформулирована цель и задачи, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведен обзор современного состояния проблемы, а именно: краткий обзор технологий малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинного типа, представлены имеющиеся в литературе данные о структуре течения в камерах сгорания с закруткой потока, полученные как экспериментальными методами, так и при помощи численного моделирования, представлены применяемые в настоящее время методы оптической диагностики потоков, в том числе при наличии горения, 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. В результате данного обзора был сделан о том, что наиболее подходящими экспериментальными подходами для проведения исследования являются анемометрия по изображениям частиц и плоскостная лазерно-индукционная флуоресценция.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальных стендов и используемых методик. Использовалось три экспериментальных стендов: модельная камера сгорания цилиндрической геометрии, работающая при нормальных условиях при умеренных числах Рейнольдса, позволяющая использовать завихрители с различной геометрией; 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; модельная камера сгорания с плоскими окнами визирования, работающая как при нормальных условиях, так и при повышенном давлении, позволяющая исследовать смешение и горение за двухконтурным фронтовым устройством модельной геометрии дизайна TURBOMECA. В работе использованы, хорошо зарекомендовавшие себя в мировой практике экспериментальные методы исследования: анемометрия по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry), в том числе с высоким времененным разрешением, плоскостная лазерно-индукционная 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).

**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. В качестве топлива использовался метан. Определена топология фронта пламени и частоты прецессии вихревого для сильной закрутки потока в случаях с горением и при его отсутствии. В потоке выявлены спиральные вихри в виде 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). Несмотря на влияние горения, сильно-закрученное течение характеризуется наличием распада вихревого ядра в форме пузыря. Динамика потока определяется глобальной спиральной модой неустойчивости.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований структуры течения в модельной камере сгорания цилиндрической геометрии при реалистичных значениях расхода воздуха (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. Проведены оценки значений турбулентной вязкости около,

коэффициента турбулентной диффузии, и соответствующих значений турбулентного числа Шмидта.

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, а также результаты исследования пламен метана и синтез-газа как при нормальных условиях, так и при повышенном давлении и подогреве воздуха. Приведено сравнение двух режимов подачи топлива (метан с парами ацетона). Особенностью данного фронтового 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-индукционной флуоресценции паров ацетона/гидроксильного радикала для измерения полей скорости и концентрации/положения фронта пламени в потоке с числом Рейнольдса  $3 \times 10^4$ .

Автором диссертации получены следующие **новые результаты**:

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 фронтового устройства. Оценен вклад адvectionной 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 фронтового устройства. Анализ измеренных полей скорости для различных режимов горения 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.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

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 показали присутствие когерентных структур, соответствующих как продольным, так и поперечным модам гидродинамической неустойчивости. Данная информация чрезвычайно полезна и может быть использована при проектировании современных малоэмиссионных камер сгорания газотурбинного типа, работающих по принципу сжигания «обедненной» смеси.

**Достоверность результатов** обеспечивается использованием современных апробированных методик проведения экспериментального исследования, анализа и обработки данных, широко применяемых передовыми научными группами по данному направлению во всем мире. Использованы современные бесконтактные оптические методы, не вносящие возмущений в динамику изучаемых систем. Проведено сравнение экспериментальных результатов с данными других авторов.

#### **Замечания:**

1. В работе используется термин «крупномасштабные вихревые структуры», однако не говорится об интегральном масштабе турбулентности, не приведены оценки этой величины. Также в Главе 3 не представлен уровень турбулентных пульсаций.
2. При обсуждении трехмерной пространственной структуры крупных вихрей в Главе 3 используется Q-критерий, однако не представлено его числовое значение.
3. В Главе 5 не указан химический состав синтез-газа, по составу которого можно судить об эффективности сжигания в закрученном потоке.

#### **Заключение**

Диссертация Чикишева Л.М. является законченной научно-квалификационной работой в области экспериментального исследования процессов переноса в камерах сгорания с закруткой потока, соответствующей специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Работа написана ясным научным языком и хорошо проиллюстрирована. Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 24 работах из списка ВАК, а также представлены на многочисленных российских и международных конференциях.

Диссертационная работа «Физическое моделирование процессов переноса в камерах сгорания с закруткой потока» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24. 09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Чикишев Леонид Михайлович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научного семинара Отдела горения и взрыва в Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, протокол от 18.11.2022 г.

гл.н.с. лаборатории 1313 ФИЦ ХФ РАН, д.ф.-м.н.

Крупкин В.Г.

Подпись гл.н.с. д.ф.-м.н Крупкина В.Г. заверяю

Учёный скретарь ФИЦ ХФ РАН к.ф.-м.н.

Ларичев М.Н.



**Полное наименование организаций:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук»

**Адрес:** 119991, Москва, ул. Косыгина, 4.

**Телефон:** +7 499 137-29-51

**Сайт организации:** <https://www.chph.ras.ru>

**e-mail:** icp@chph.ras.ru