

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию 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**

Кандидатская диссертация Чикишева Л.М. посвящена детальному экспериментальному 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 исследования обусловлена необходимостью развития технологии сжигания «обедненной» топливовоздушной смеси в камерах сгорания газотурбинного типа для снижения вредных выбросов в атмосферу. Развитие данной технологии связано с решением ряда проблем, а именно: стабилизацией пламени вблизи бедного срыва, предотвращением возникновения режимов вибрационного горения и проскока пламени. Прогнозирование нестационарных явлений, связанных с наличием крупномасштабных когерентных вихревых структур в камере сгорания является важной задачей. При этом для верификации моделей численного расчета, используемых при проектировании газотурбинного оборудования, необходима достоверная экспериментальная информация. Исследование, представленное в диссертации Чикишева Л.М., без сомнения способствует углублению понимания механизмов влияния крупномасштабных вихревых структур на процессы переноса и горения в камерах сгорания с закруткой потока и обладает практической значимостью.

Основные результаты моего **анализа достижений соискателя**, изложенных им в тексте диссертации, сводятся к следующему:

Во введении (объемом 8 страниц) достаточно ясно сформулированы основные цели и задачи работы, представлен авторский взгляд на новизну, практическую ценность и достоверность полученных результатов и перечислены основные результаты работы, выносимые на защиту. В целом, введение производит хорошее впечатление и выполняет задачу информирования читателя о круге рассматриваемых в работе проблем, их актуальности и важности, а также об основных целях диссертации, её структуре и степени апробации.

В первой главе (объемом 33 страницы) приведен хорошо структурированный 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, в том числе при наличии горения, при этом акцент сделан на экспериментальных методах, представлена информация о имеющихся в мире передовых исследовательских 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. На основе приведенного обзора соискатель приходит к обоснованному выводу об актуальности темы его диссертации и показывает необходимость применения современных экспериментальных методов, позволяющих проводить исследования без воздействия на структуру и динамику течения в модельных камерах сгорания.

Вторая глава (объемом 17 страниц) является методической и посвящена описанию экспериментальных стендов и используемых методик. Использовались три экспериментальных стенда: 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 фронтным 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 фронтным устройством модельной геометрии. В работе использованы, хорошо зарекомендовавшие себя в мировой практике экспериментальные методы исследования: анемометрия по изображениям частиц, в том числе с высоким временным разрешением, плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция 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). Уровень квалификации соискателя в указанных выше методических вопросах достаточно высок и соответствует лучшим мировым практикам.

В третьей главе (объемом 20 страниц) 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. Представлены результаты для двух характерных случаев закрутки потока: слабая закрутка – до распада вихревого ядра, и сильная закрутка, которая подразумевает наличие ярко выраженного распада вихревого ядра, уже для изотермического течения в отсутствие горения. Проанализирована пространственная структура пульсаций поля скорости с применением метода главных компонент и динамика потока на основе разложения полей скорости по динамическим модам. 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 смещения (между основной струей и угловой зоной рециркуляции) и вторым во внутреннем слое смещения (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 (объемом 10 страниц) представлены результаты исследований структуры течения в модельной камере сгорания цилиндрической геометрии при реалистичных значениях расхода воздуха (число Рейнольдса составляло $1,5 \times 10^5$) за фронтовым устройством модельной геометрии. Для моделирования переноса пассивной примеси в поток добавлялись пары ацетона. Несомненной особенностью данной главы является получение одновременных полей мгновенной скорости и концентрации, что позволило проанализировать смешанные корреляции и, в свою очередь, провести оценки значений турбулентной вязкости, коэффициента турбулентной диффузии, и соответствующих значений турбулентного числа Шмидта.

В пятой главе (объемом 38 страниц) 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 подогрева 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-индуцированной флуоресценции паров ацетона/гидроксильного радикала для измерения полей скорости и концентрации/положения фронта пламени в потоке с числом Рейнольдса 3×10^4 . 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. Особенностью данной главы является применение для анализа пространственных распределений кинетической энергии турбулентности тройной декомпозиции: разложение поля скорости на сумму среднего, когерентных и стохастических пульсаций, а также применение методики условного осреднения полей концентрации пассивной примеси, либо гидроксильного радикала по модам ортогонального разложения полей скорости, что позволило впервые оценить вклад крупномасштабных когерентных вихревых структур в перенос массы и импульса.

Проведенный выше анализ основных достижений диссертации показывает, что работа выполнена на высоком современном мировом уровне и обладает несомненной научной новизной.

Степень достоверности полученных результатов представляется достаточно высокой ввиду следующих обстоятельств. Методы измерений, применяемые в данной диссертации хорошо освоены в научном коллективе, где соискатель работает. Методика исследования построена по принципу от простого – к сложному. Исследования включают как эксперименты при атмосферном давлении для достаточно простой конфигурации горелочного устройства, так и измерения при повышенном давлении в условиях близких к натурным по числу Рейнольдса с использованием модельных горелочных устройств, используемых в мировой практике, так и эксперименты с горением при повышенном давлении и подогревом окислителя. Приведены результаты сравнения с известными из литературы результатами других авторов, полученными для аналогичных горелочных устройств.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, представляется мне весьма высокой ввиду следующих обстоятельств. 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. Глубокий, всесторонний анализ экспериментальных данных с применением различных, дополняющих друг друга, подходов к их обработке, сочетается с сопоставлением полученных результатов с результатами предыдущих работ. Диссертация представляется достаточно цельной, логически завершенной, а её выводы хорошо обоснованы.

Замечания:

1. В главе 3 широко обсуждается пространственная структура главных POD-мод полей пульсаций скорости как для изотермического течения, так и для пламен обедненной метановоздушной смеси, однако не приведены распределения компонент кинетической энергии турбулентности.
2. В Главе 4 представлены поля и профили производных пульсаций скорости, концентрации и смешанных корреляций, однако не указано какая использовалась дифференциальная схема при обработке первичных экспериментальных данных.
3. В Главе 5 обсуждаются пламена метана и синтез-газа, однако не указан химический состав синтез-газа.

Заключение

Сделанные выше замечания не снижают общую весьма высокую оценку диссертации Чикишева Л.М., представляющую собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение важной научной задачи экспериментального исследования процессов переноса в камерах сгорания с закруткой потока. Тема диссертации является актуальной, а характер выполненных исследований соответствует специальности 1.3.14. - теплофизика и теоретическая теплотехника. Все основные результаты диссертации хорошо опубликованы в отечественных и международных научных изданиях, все 24 публикации – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК, а также широко обсуждались

на российских и международных конференциях. **Автореферат** составлен в соответствии с установленными требованиями и отражает содержание диссертации.

Суммируя вышесказанное, можно заключить, что по своей актуальности, объему выполненной автором работы, новизне полученных им результатов, их достоверности, научной и практической значимости, диссертация Чикишева Л.М. «Физическое моделирование процессов переноса в камерах сгорания с закруткой потока» удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент, доктор технических наук (01.04.14 - Теплофизика и молекулярная физика), ведущий научный сотрудник лаборатории активных коллоидных систем ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

07.12.2022

Кичатов

Кичатов Борис Викторович

Подпись Кичатова Б.В. заверяю

Ученый секретарь, ФГБУН

Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

к.ф.-м.н.



Колобов А.В.

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53;

Телефон: +7 969 086-30-14;

Адрес электронной почты: kichatovbv@lebedev.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Я, Кичатов Борис Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Чикишева Леонида Михайловича, и их дальнейшую обработку.