



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44
E-mail: bauman@bmsu.ru
ОГРН 1027739051779
ИНН 7701002520 КПП 770101001

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по
научной работе д.т.н., профессор

_____ В.Н. Зимин

_____ 2019 г.



_____ № _____

на № _____ от _____

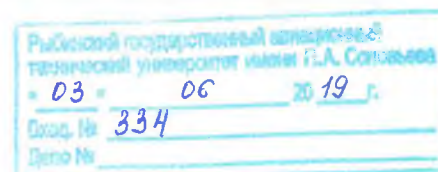
ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Бадерникова Артема Витальевича
**«Модифицированный метод расчёта горения в вихревых
противоточных горелочных устройствах»**, представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Актуальность темы исследования

В настоящее время устройства сжигания топлива достигли высокой степени газодинамического, технологического и конструктивного совершенства. При этом сохраняется потенциал их дальнейшего совершенствования путём применения новых материалов и технологий, интенсификации рабочего процесса при обеспечении установленных параметров по эмиссии загрязняющих веществ, надёжности и экономичности.

Одним из перспективных направлений является разработка устройств, которые используют концепцию сжигания топлива на встречно направленных, закрученных потоках в ограниченном пространстве вихревой камеры. Разработаны вихревые противоточные устройства воспламенения и



стабилизации пламени авиационных газотурбинных двигателей и наземных газотурбинных установок; камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей и гибридных ракетных двигателей, доводка которых проходила в основном с помощью экспериментов. Ограниченное использование численного моделирования на этапах проектирования и доводки связано с тем, что ранее использовавшиеся подходы использовали ряд приближений, которые не в полной мере отражают физические явления, присутствующие в вихревых противоточных горелочных устройствах.

Это определяют важность и актуальность диссертационного исследования, направленного на разработку модифицированного метода расчёта горения в вихревых противоточных горелочных устройствах на основе трёхмерного численного решения уравнений Навье-Стокса и химической кинетики, применение которой дополняет ранее разработанные аналитические методики и критериальные соотношения.

Решение поставленной автором цели исследования позволяет за короткое время (по сравнению с подготовкой и проведением эксперимента) оценивать различные варианты конструкции вихревых противоточных горелочных устройств. Это открывает широкие возможности для их разработки и совершенствования, что определяет высокую актуальность направления исследований, проводимых в диссертационной работе.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа содержит 168 страниц машинописного текста, 106 рисунков, 137 наименований литературы и 2 приложения.

Главы диссертации расположены в логичной последовательности, обусловленной целью выполняемой работы, и обладают внутренним единством. Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи диссертационной работы. В первой главе проведен анализ известных экспериментальных данных и подходов к моделированию процессов в вихревых трубах и вихревых горелках. Во второй главе представлены используемые в исследовании математические модели. Третья глава посвящена определению наилучшей комбинации физико-математических моделей, обеспечивающих наиболее близкий к эксперименту результат. Автор выбрал правильный подход от решения простых модельных задач к более сложным и комплексным при постоянном сопоставлении полученных расчётных данных с экспериментами. В четвёртой главе сформулированы положения модифицированного метода расчёта и физико-математической модели. В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования теплового состояния вихревой противоточной горелки и по полученным данным проведена апробация разработанного метода, подтвердившая его корректность. В заключении

приводятся основные результаты диссертационной работы.

Применяемые сокращения и терминология соответствует общепринятым. При использовании результатов работ других авторов в диссертации даются ссылки на соответствующие источники.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации

Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и названию работы.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат диссертации достаточно полно и последовательно отражает содержание и основные положения диссертации.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

Все результаты численных исследований, их обработка, обобщение и анализ, а также экспериментальное исследование теплового состояния горелочного модуля, приведенные в диссертации, получены лично автором, что отражено в публикациях. На основе выполненных работ соискателем разработан модифицированный метод расчёта и физико-математическая модель, составленная из известных моделей, реализованных в коммерческом программном комплексе ANSYS CFX.

Так как возможное число вариантов комбинаций моделей и способов постановки задачи для расчёта, реализованных в ANSYS CFX, очень большое, даже если отбросить их несовместимые сочетания, то разработанный модифицированный метод и физико-математическая модель являются новыми. Вклад диссертанта в их разработку является определяющим.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов работы и обоснованность научных положений обеспечивается системным подходом к выбору физико-математических моделей и модельных задач для их верификации, применением теории подобия и основополагающих законов сохранения массы, импульса, энергии использованием сертифицированного комплекса ANSYS CFX, применением сертифицированных средств измерений при проведении экспериментальных работ и подтверждается соответствием расчетных и экспериментальных данных.

Результаты диссертации изложены в 2 статьях, 1 из которых опубликована в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 статья в зарубежном электронном издании, индексируемом в базе данных Scopus, и представлены на ряде всероссийских и международных конференций. Также диссертационная работа была представлена на научно-техническом семинаре в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана».

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Разработка верифицированного метода численного моделирования с достаточно четко определённой погрешностью расчётов позволяет использовать его при проектировочных работах, что позволяет заменить натурные испытания их математической моделью, и таким образом, сократить стоимость и время доводки конструкции. Предложенный модифицированный метод расчётов базируется на моделях, реализованных в программном комплексе ANSYS CFX, известном своей простотой, устойчивостью и поэтому широко применяемом в промышленности и учебном процессе, что облегчает его внедрение. Важным достоинством работы является факт её доведения до реализации в учебном процессе и применения в условиях производства.

Теоретическая значимость работы определяется использованием коррекции кривизны линий тока для модели турбулентности $k-\epsilon$, ранее не применявшейся при расчёте вихревых противоточных горелок, а также комплексностью применяемых физико-математических моделей турбулентности, горения, химической кинетики, сопряжённого теплообмена, важность одновременного использования которых продемонстрирована в диссертации.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертации научные результаты рекомендуется использовать при разработке новых и модернизации существующих вихревых противоточных горелочных устройств: для оценки теплового состояния стенок вихревой камеры и параметров закрученного реагирующего потока в ней; для анализа и интерпретации результатов экспериментов на этапе доводки. Разработанный модифицированный метод возможно применять при моделировании камер сгорания, где присутствуют сильно закрученные течения с противотоком в ограниченном пространстве с реакциями горения.

Новизна полученных результатов

Научная новизна представленной диссертации состоит в применении коррекции кривизны линий тока Спаларта и Шура для модели турбулентности $k-\epsilon$, ранее не применявшейся для расчётов вихревых противоточных горелочных устройств. При этом результаты, полученные для модели $k-\epsilon$ с коррекцией кривизны линий тока, сопоставимы по точности с моделями турбулентности рейнольдсовых напряжений при значительно лучшей устойчивости расчёта и экономичности вычислительных ресурсов. В ходе работы доказана необходимость применения моделей рейнольдсовых напряжений или двухпараметрических моделей турбулентности с поправкой на кривизну линий тока при проведении расчётов вихревых противоточных

горелочных устройств с целью корректного определения окружной компоненты скорости. Данное положение обосновано сопоставлением расчёта с экспериментом для различных задач и выяснением роли вихревой вязкости в реализации квазитвёрдого вращения потока или его движения по закону свободного вихря.

Еще одной отличительной особенностью разработанного модифицированного метода является одновременное использование комплекса моделей турбулентности, горения и химической кинетики, излучения и сопряженного теплообмена. В ранее опубликованных методиках использовались только отдельные физико-математические модели, и ни в одной из них не был одновременно смоделирован весь комплекс процессов газодинамики, горения и теплообмена.

Замечания по диссертационной работе

1. Среди допущений о характере турбулентного течения и с учётом моделирования только сектора геометрической модели не освещён вопрос возможной прецессии вихревого ядра внутри вихревой камеры. В то же время прецессия требует включения в расчёт всей окружности геометрической модели и серьёзно влияет на поле течения.

2. Для расчётов радиационных свойств продуктов сгорания применяется модель серого газа, в рамках которой сделано предположение, что спектр излучения непрерывный, однако более точным представляется подход на основе многополосной модели, которая позволяет учитывать спектральную зависимость радиационных свойств среды и тем самым повысить точность расчёта излучения газа.

3. В диссертации подробно исследовано влияние моделей турбулентности на результат расчёта, но не определена степень воздействия интенсивности турбулентности, задаваемой на входе в расчётную область на турбулентные параметры потока в вихревой камере.

4. Из экспериментальных работ Strykowski, Forliti, Gillgrist известно, что при большой степени закрутки происходит реламинаризация турбулентного горения, но в тексте диссертации не приведена оценка возможности возникновения данного эффекта для рассматриваемых задач.

5. В работе рассматривается течение многокомпонентной смеси газов, но не указаны какие коэффициенты диффузии были выбраны для проведения расчётов.

6. В главе 4 указано, что полученные при расчёте данные могут быть использованы для оптимизации конструкции, но не указаны способы оптимизации и их связь с предлагаемым в диссертации методом.

Высказанные замечания принципиально не влияют на общую положительную характеристику диссертационной работы.

Заключение по диссертации

По результатам рассмотрения диссертационная работа

А.В. Бадерникова «Модифицированный метод расчёта горения в вихревых противоточных горелочных устройствах» на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по разработке метода расчёта горения в вихревых противоточных горелочных устройствах на основе трёхмерного численного решения уравнений Навье-Стокса и химической кинетики.

Решенная задача имеет существенное значение для развития соответствующей отрасли знаний, а именно разработки высокоэффективных горелочных устройств на основе встречно направленных закрученных ограниченных потоков, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Автор диссертационной работы, Бадерников А.В., заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заключение рассмотрено на заседании кафедры «Теплофизика» (Э6) МГТУ им. Н.Э. Баумана, протокол № 11 от 08.05.2019 г.

Заведующий кафедрой
«Теплофизика»

А.Ю. Чирков

Отзыв составил:
Профессор кафедры
«Теплофизика»

Ю.М. Гришин

Гришин Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана,

научная специальность 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая
теплотехника»,

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, кафедра Э6

телефон: +7 (499) 265 7905

адрес электронной почты: ygrishin@bmstu.ru

Подпись д.т.н., профессора Ю.М. Гришина удостоверяю:

