

Отзыв официального оппонента

Зубрилина Ивана Александровича

на диссертационную работу Бадерникова Артема Витальевича

“МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГОРЕНИЯ В ВИХРЕВЫХ
ПРОТИВОТОЧНЫХ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ”,

представленную на соискание соискание учёной степени кандидата

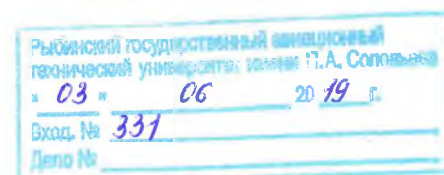
технических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и

теоретическая теплотехника

На протяжении нескольких десятков лет по настоящее время исследованием процессов в вихревых противоточных горелочных модулях занимались научные группы в России, США, Индии, Китае и многих других странах. Однако, не смотря на это, не существует общепринятого подхода к моделированию вихревых противоточных горелочных устройств. Наряду с этим противоточные вихревые горелочные устройства нашли широкое применение в технических устройствах и требуют дальнейшего экспериментального исследования, физического и численного моделирования процессов переноса массы, импульса и энергии при конвекции, излучении, сложном теплообмене и физико-химических превращениях, происходящих в них. Данное обстоятельство обуславливает **актуальность** работы.

Диссертационная работа оформлена согласно требованиям к диссертационным работам, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Полный объем диссертации составляет 168 страниц, которые содержат 106 рисунков, 137 наименований литературы, два приложения.

Научная новизна работы заключена в том что доказана необходимость использования поправки на кривизну линий тока при



использовании двухпараметрических моделей при расчете вихревой камеры противоточного горелочного устройства, а также в новой физико-математической модели и модифицированного метода численного расчёта совместного переноса массы, импульса и энергии в многокомпонентной химически реагирующей смеси по проточной части вихревых противоточных горелочных модулей. Данный подход позволяет в разы уменьшить среднее отклонение результатов расчета от экспериментальных данных при сохранении общего времени расчета.

Практическая значимость работы заключается в применении её результатов при проектировании вихревых противоточных горелочных устройств применяемых в камерах сгорания газотурбинных двигателей, газотурбинных установок, а также в жидкостных ракетных двигателя, что позволит существенно снизить временные и материальные затраты при проектировании новых изделий.

Достоверность полученных результатов достигается:

- применением сертифицированного программного комплекса ANSYS CFX, верифицированного на наборе задач, используемых для оценки качества физико-математических моделей горения;

- использованием фундаментальных законов сохранения массы, импульса, энергии;

- выбором той или иной физико-математической модели с учетом их ограничений и сфер применения, а также последующей проверкой по экспериментальным данным с известными погрешностями измерений физических величин.

Во введении помимо актуальности темы диссертационной работы, представлены задачи исследования, основные защищаемые положения работы, а также их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проанализированы экспериментальные данные, структура течения и методы моделирования в устройствах с

противотоком, а также результаты численного моделирования термогазодинамических процессов и процессов горения. Обоснована необходимость использования численных методов для анализа процессов в противоточных вихревых горелочных устройствах. Автором были выявлены основные особенности течений в противоточных вихревых горелочных устройствах, а также недостатки в существующих методиках расчета, которые не позволяют прогнозировать характеристики горелочных устройств с достаточной степенью точности, а именно: а) не учитывается анизотропность турбулентности; б) используются глобальные кинетические механизмы, что приводит к завышенной температуре пламени; в) не обеспечивается расчёт температуры стенок вихревой камеры (стенки полагаются адиабатными). Вышеперечисленные недостатки существующих моделей подтверждают целесообразность и актуальность выбранной цели исследования.

Во второй главе детально изложены наиболее часто используемые физико-математические модели для расчёта турбулентного течения закрученного потока с тепломассообменом, процессов горения, лучистого теплообмена и теплопередачи. Проанализированы их преимущества, недостатки и выбраны модели для верификационных расчётов.

В третьей главе представлены результаты верификации физико-математических моделей процессов в вихревых горелочных устройствах. Верификация каждого элемента модели проводилась отдельно с последующим объединением их в общую модель. Так, отработка физико-математических моделей проводилась для следующих условий: моделирование закрученного потока в вихревой камере, моделирование закрученного потока в вихревом противоточном горелочном модуле, расчёт адиабатной температуры горения идеально перемешанной смеси и частично-перемешанное горение, моделирование процесса горения закрученного потока в вихревой камере.

В результате найдена комбинация моделей турбулентного течения, горения, лучистого и сопряженного теплообмена, которая дает наилучшие результаты при сравнении с экспериментальными данными.

Таким образом, наиболее близкие к эксперименту результаты достигаются на модели k-s СС. Погрешность определения параметров в вихревой камере составляет: температура ~25%; окружная компонента скорости ~12%; осевая компонента скорости ~20%, что позволяет в ~ 2 раза улучшить точность расчёта окружной компоненты скорости по сравнению с классическими двухпараметрическими моделями турбулентности без увеличения времени расчета.

В четвертой главе сформулирована физико-математическая модель и модифицированный метод моделирования процессов в вихревых камерах. Также приведены основные отличия модифицированного метода и физико-математической модели от известных подходов.

Пятая глава посвящена расчетной и экспериментальной оценке теплового состояния вихревого противоточного горелочного модуля. В главе подробно представлена методика опытных исследований и экспериментальная установка, приведено метрологическое обеспечение эксперимента и оценка погрешностей измерений, показаны режимы работы и результаты исследования теплового состояния вихревой противоточной горелки, а также результаты апробации разработанной физико-математической модели и метода моделирования.

Анализ результатов расчётов показал, что разработанная автором физико-математическая модель и метод моделирования позволяют получить результат, который качественно и количественно согласуется с экспериментальными данными. Результаты работы позволяют значительно улучшить среднюю точность расчёта теплового состояния стенок с 15-24% до 7-9%.

Таким образом можно сделать вывод, что задачи, поставленные в начале работы, **выполнены**, а цель работы можно считать **достигнутой**.

Основные результаты работы достаточно точно отражены в публикациях автора и были широко представлены на конференциях различного уровня, что свидетельствует о достаточной апробации результатов работы.

Автореферат полностью отражает материалы основного текста диссертационной работы, в нем кратко изложены основные положения и результаты работы.

К **достоинствам** работы стоит отнести:

- впервые учтены тепловые потоки в стенки вихревого противоточного горелочного устройства и показано, что данный фактор должен быть учтён при моделировании;

- изучены и протестированы практически все существующие в коммерческих программных продуктах модели турбулентного течения, основанные на осреднениях по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса, а также основные модели горения и химической кинетики, что свидетельствует о наиболее рациональном полученном решении;

- методический подход в достижении поставленной цели, выраженный в широком и всестороннем обзоре литературы, обширной программе расчетного исследования, последовательном движении от простого к сложному, свидетельствует о высокой профессиональной и научной квалификации автора;

- практическую ориентацию работу, выраженную в стремлении автора к формированию методики, которая одновременно уменьшает время на каждый расчетный цикл и при этом увеличивает точность расчета;

- впервые рассчитано вихревое противоточное горелочное устройство в постановке, учитывающей одновременно анизотропность турбулентного

течения, подробный кинетический механизм химических реакций, лучистый теплообмен и тепловое состояние стенок.

Несмотря на положительную оценку диссертационной работы можно сделать следующие **замечания**:

- спорным является тезис автора о том, что горение в условиях, приближенных к реактору идеального смешения, которые возникают в вихревой противоточной горелке, является более устойчивым, по сравнению, например, с горением в тонком фронте пламени. К тому же данный тезис противоречит с дальнейшим использованием в работе модели горения, основанной на тонком фронте пламени;

- в работе сказано о важности определения положения фронта пламени, однако в замыкающем уравнении Зимонта используется стандартная зависимость для определения скорости распространения ламинарного пламени и критической скорости деформации пламени, которые не являются универсальными и требуют определения для конкретных условий расчета;

- механизмы химических реакций были протестированы только на адиабатическую температуру пламени, тогда как должны быть проверены на пиролиз компонентов, время задержки воспламенения и скорость распространения пламени для требуемого диапазона давлений, температур и исходных составов;

- не показано влияние модифицированной расчетной методики на точность определения базовых характеристик вихревого горелочного устройства, как части более сложной системы, такой как камера сгорания, а именно полноты сгорания, срывные характеристики, эмиссия вредных веществ и других;

- автором отмечено, что принципиальные свойства вихревых закрученных течений - нестационарный процесс, тогда как сам автор

использует стационарный подход при моделировании физико-химических процессов.

Несмотря на замечания, диссертационная работа Бадерникова Артема Витальевича по актуальности, научно-техническому уровню, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций соответствует требованиям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства от 24.09.2013 г № 842, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники. Бадерников Артем Витальевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
инженер лаборатории моделирования
процессов горения НОЦ ГДИ
Самарского университета,
кандидат технических наук

Иван Александрович Зубрилин

Контактные данные:

email: zubrilin.ia@ssau.ru

Тел.раб.: 8 (846) 267-45-69

Тел.моб.: +7 (919) 80-65-321

Адрес: ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086, Самарский университет, НОЦ ГДИ

