

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА

Снегирёва Александра Юрьевича

на диссертацию Бадерникова Артема Витальевича

«Модифицированный метод расчета горения

в вихревых противоточных горелочных устройствах»,

представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

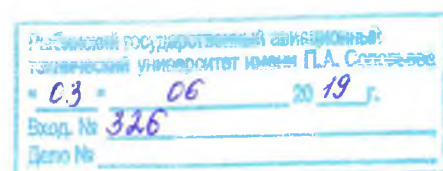
по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Актуальность работы. Сжигание топлива в противоположно-направленных сильно закрученных потоках открывает возможность существенного повышения мощности тепловыделения при снижении размеров и массы конструкции. Кроме того, управление структурой потока и параметрами пламени позволяет снизить тепловую нагрузку на конструкцию. В то же время, численное прогнозирование структуры и динамики реагирующих потоков данного типа представляет исключительно сложную задачу вычислительной теплофизики, не имеющую к настоящему времени окончательного решения. Это сдерживает разработку новых горелочных устройств и не позволяет обеспечить их максимальную эффективность и надежность. В настоящее время ведутся интенсивные исследования, направленные на повышение достоверности численных прогнозов и разработку оптимальной методики численного расчёта.

Нацеленность представленной работы на количественное оценивание прогностических возможностей основных компонентов модели, выполнение измерений теплового состояния горелочных устройств, выявление наилучших моделей и разработку технологии моделирования, обеспечивающей наилучшее согласие результатов расчётов с данными испытаний позволяет сделать вывод о её несомненной **актуальности**.

Содержание работы. Работа содержит введение, пять глав, заключение (основные результаты и выводы), списки сокращений, обозначений и используемых источников.

Во введении объясняется специфика смешения и сжигания реагентов в противоточных вихревых устройствах, обусловленная концентрацией тепловыделения в вихревом ядре потока, окружённом относительно холодной периферийной зоной, экранирующей конструкцию горелки от теплового воздействия пламени. Автор обоснованно утверждает, что для получения достоверных результатов численного моделирования данного типа течений требуется понимание особенностей микро- и макроструктуры потока и формулирует задачи исследования, которые включают сравнительный анализ базовых компонентов расчётной модели, выработку рекомендаций по их применению для данного типа течения, экспериментальное исследование работы устройства и сравнение результатов расчётов с помощью модифицированной методики с результатами экспериментов. Следует подчеркнуть, что одновременное наличие таких факторов как закрутка потока, противоположная направленность струй, горение в турбулентном потоке, а также сопряжённый теплообмен газового потока и конструкции являются отличительной особенностью данного исследования.



Приводится обсуждение новизны данной работы, её теоретической и практической значимости, апробации и публикации результатов, применённых методов исследования, личного вклада соискателя.

Глава 1 содержит описание структуры вихревых потоков, возникающих в противоположных горелках. Литературный обзор представляет подробный и достаточно полный анализ особенностей потока, отдельные части которого имеют черты вынужденного и свободного вихрей и их комбинации. Отмечается, что распределение радиальной составляющей скорости газа наименее изучено в экспериментах. Наиболее сложные упорядоченные структуры потока имеют форму вихревых жгутов, формирующих несколько рядов. Течение характеризуется выраженной анизотропностью даже в условиях развитой турбулентности. Даже при постоянных расходах в потоке развивается крупномасштабная неустойчивость в форме низкочастотной прецессии приосевого вихря, а также высокочастотные колебания на границе раздела периферийного и осевого вихря. Отмечается возможность распада вихря и вторичных течений. Справедливо отмечено, что воспроизводство указанных особенностей потока при численном моделировании представляет сложную задачу.

Горение топлива в вихревых противоположных устройствах протекает в существенно разных режимах, зависящих от коэффициента избытка окислителя в смеси. Существование широкого спектра режимов указывает на то, что использование упрощённой модели турбулентного горения, разработанной для одного из режимов, может быть недостаточно для описания других. Приводится обзор экспериментальных исследований вихревых противоположных горелок, и подчёркивается роль противотока холодного газа в снижении теплового воздействия пламени на стенки камеры сгорания. При этом показано, что как геометрические параметры устройства, так и давление на входе оказывают немонокотное влияние на интенсивность горения и устойчивость факела.

Существующий опыт численного моделирования в основном опирается на технологию RANS, причём в ряде случаев используется упрощённая двумерная или осесимметричная постановка задачи. В ряде работ расчёты позволили воспроизвести существование вторичных вихрей. Наиболее часто используются модели турбулентной вязкости, но наилучшее согласие с экспериментами получено при использовании анизотропных моделей. При численном моделировании потоков с горением, как правило, применялись двухпараметрические модели турбулентности совместно с моделью диссипации вихрей для описания турбулентного пламени с использованием глобальной (брутто) реакции. В последнее десятилетие стали публиковаться работы, в которых учитываются детальные химические механизмы (в рамках модели микроламинарного пламени с назначенной функцией вероятности для смеси долей). Это позволило существенно уточнить прогноз поля температуры в факеле. Важным недостатком ряда предыдущих работ является игнорирование сопряжённого теплообмена потока и конструкции.

Приведённый обзор позволяет сделать важный вывод о направлении развития технологии моделирования, которая должна учитывать кривизну линий тока и анизотропность (характерную для вихревых потоков), детальные химические механизмы окисления горючего и

теплопередачу в конструкции изделия. Именно это направление выбрано автором для модификации ранее использовавшихся подходов.

Глава 2 содержит описание классических методов численного моделирования турбулентных течений, моделей горения и методов расчёта переноса теплового излучения, реализованных в доступном автору программном обеспечении. Среди моделей горения рассматриваются модель диссипации вихрей, модель микроламинарного пламени с назначенной функцией плотности вероятности для смесевой доли (предназначена для диффузионного горения), модель замыкания на основе скорости турбулентного пламени (предназначена для горения предварительно перемешанных реагентов), а также комбинированная модель, предназначенная для горения в потоках с частичным перемешиванием. Приводится краткое обобщение особенностей методов расчёта переноса излучения (метод сферических гармоник, метод Монте Карло и метод дискретного переноса). Предпочтение отдано комбинированной модели горения для частично перемешанных реагентов и методу дискретного переноса.

В **Главе 3** приводятся результаты авторского исследования, нацеленного на оценку точности и вычислительной эффективности вышеуказанных моделей турбулентности, горения и переноса теплового излучения при решении четырёх модельных задач. Выбор задач, в которых рассматривается вихревое течение без горения, турбулентный факел без закрутки потока, и, наконец, горение в вихревой горелке, представляет отличную возможность для выявления прогностических возможностей моделей и расчётного кода для целей данной работы. Во всех случаях имеются хорошо задокументированные экспериментальные данные, что позволяет выполнить всестороннюю и детальную апробацию (валидацию) разрабатываемой автором технологии моделирования.

Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными позволило автору становить, что ни одна из двухпараметрических моделей RANS не воспроизводит структуру закрученного потока, если не используется коррекция модели с учётом локальной кривизны линий тока. Модели рейнольдсовых напряжений справляются с этой задачей, однако требуют значительных вычислительных затрат (в 4-5 раз больше, чем модели турбулентной вязкости). Оптимальным оказывается использование двухпараметрической модели со специальной коррекцией генерации энергии турбулентности с учётом локальной кривизны линий тока.

Численное моделирование турбулентного струйного пламени Sandia flame D (без закрутки) позволило автору сравнить несколько химических механизмов. Предпочтение отдано механизму GRI-Mech 3.0, с помощью которого получено наилучшее согласие расчётных и измеренных профилей CH_4 , CO_2 , OH , CO , H_2O , O_2 , H_2 и температуры.

Результаты расчётов турбулентного факела в вихревой горелке показали существенную роль сопряжённого теплообмена и позволили определить требования к угловой дискретизации в методе расчёта переноса излучения. При использовании двухпараметрической модели RANS с поправкой на локальную кривизну линий тока получено удовлетворительное согласие расчётной и экспериментальной структуры потока.

Основным результатом данной главы является определение оптимальной комбинации моделей турбулентности, горения и переноса теплового излучения, предназначенных для численного моделирования противоточных горелочных устройств.

Глава 4 содержит принципы численного моделирования противоточных горелочных устройств, сформулированные с учётом опыта расчётов, приведённых в предыдущей главе. Разрабатываемая методика предназначена для уточнения результатов приближённого анализа, выполняемого вручную на основе балансовых соотношений, аналитических и полуэмпирических методов.

Глава 5 посвящена экспериментальному и численному исследованию горения и теплообмена в вихревой противопоточной горелке. Автор выполнил тщательное исследование теплового состояния конструкции с помощью тепловизионных измерений. В экспериментах и расчётах рассмотрены четыре режима работы горелки с разными расходами горючего и воздуха (и разными значениями коэффициента избытка окислителя). Результаты работы убедительно показывают, что предложенная автором методика моделирования обеспечивает согласие результатов расчётов с данными измерений температуры.

Научная новизна. Наиболее важными являются следующие новые результаты, полученные в данной работе.

1. Показана достаточность введения поправки для генерации кинетической энергии турбулентности, учитывающей локальную кривизну линий тока осреднённого течения, для адекватного воспроизведения внутренней структуры закрученного потока в вихревой камере при использовании двухпараметрической модели турбулентности.

2. Усовершенствована методика численного моделирования горения и теплообмена в противоточных вихревых горелочных устройствах.

3. Получены новые экспериментальные данные о тепловом состоянии элементов конструкции горелки в четырёх режимах работы с разными расходами горючего и окислителя.

Достоверность результатов и выводов не вызывает сомнений. Достоверность результатов численных расчётов определяется тщательным обоснованием сходимости, анализом влияния расчётной сетки и сопоставлением с экспериментальными данными. Достоверность результатов измерений определяется калибровкой используемых измерительных средств, многократным повторением измерений и количественной оценкой неопределённостей.

По работе имеются следующие **замечания**.

1. Автор использует технологию моделирования турбулентного потока на основе осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Однако опыт последнего времени указывает на то, что наиболее универсальной, информативной и потому наиболее перспективной стратегией моделирования является использование вихреразрешающих методов (LES). Несмотря на отличия между существующими подходами к подсеточному моделированию турбулентных пульсаций, не разрешаемых на расчётной сетке, указанные отличия не являются столь же критичными, как различия между моделями RANS (по крайней мере при достаточном сеточном разрешении). Следует отметить, что наиболее подробные сетки, использованные автором в рамках RANS-моделирования, могут быть использованы для про-

странственного разрешения наиболее крупных вихревых структур. Особенно важно то, что применяемая автором стратегия (в отличие от LES) не позволяет выполнить анализ нестационарных эффектов и неустойчивостей, которые имеют важное значение для надёжной работы рассматриваемых устройств.

2. В работе выполнен детальный сравнительный анализ результатов разных моделей турбулентности. В то же время анализ для моделей турбулентного горения ограничен применением лишь одного подхода (модель BVM), предусматривающего одновременное применение замыкания на основе скорости турбулентного пламени и модели микроламинарного пламени с назначенной функцией плотности вероятности для смеси доли. В программном обеспечении ANSYS такой подход ориентирован на моделирование наиболее сложных сценариев турбулентного горения, включающего как диффузионный, так и «перемешанный» режимы. Приведённое в работе описание и обоснование данного подхода недостаточно подробно. В частности, остаётся неясным, как именно используется детальный химический механизм при выполнении расчёта с помощью модели горения BVM, и как эта модель (изначально разработанная для горения предварительно перемешанных реагентов) трансформируется для описания горения при отдельной подаче горючего и окислителя (этот сценарий рассматривается в главе 5).

Для целей данной работы было бы полезно показать результаты расчётов, полученные с помощью других методов замыкания, в частности – часто применяемой модели диссипации вихрей.

3. В работе приводится недостаточно информации о том, как учитываются спектральные свойства продуктов сгорания в расчёте эмиссии и поглощения теплового излучения. Как вычисляется эффективный коэффициент поглощения «серой» смеси? С точки зрения моделирования тепловых режимов элементов конструкции представляют значительный интерес такие вопросы как доля энергии, излучаемой пламенем, соотношение и абсолютные значения лучистых и конвективных тепловых потоков на поверхностях. В расчётах эмиссии и поглощения излучения не учитывается вклад сажи. Ещё более важным потенциальным источником погрешности расчётной эмиссии излучения представляется использование в расчёте осреднённых значений температуры и концентраций, доступных в методе RANS, без учёта турбулентных пульсаций.

4. Оптимальное количество лучей, используемых в методе расчёта переноса теплового излучения, зависит от размера источника излучения, его положения, и от геометрии окружающих конструкций. В связи с этим утверждение автора о том, что метод дискретного переноса с 32 лучами «являются оптимальными по точности и производительности» представляется справедливым только для рассмотренной автором геометрии изделия.

5. Используемая автором терминология не всегда соответствует устоявшейся практике, в соответствии с которой выполняемое в главе 3 сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными принято обозначать термином «валидация» (автор называет это верификацией). Применяемый далее в аналогичных обстоятельствах термин «апробация» (раздел 5.4) является более адекватным, хотя и он не является общепринятым.

Приведённые замечания носят уточняющий характер, *не влияют на основные результаты, полученные в данной работе, и не снижают её высокой научной и практической значимости*. Работа носит завершённый характер. Разработанная в ней методика численного моделирования турбулентного горения в вихревых противоточных горелочных устройствах, результаты измерений температуры поверхностей конструктивных элементов, выводы о предпочтительных моделях турбулентности, турбулентного горения и методах расчёта переноса теплового излучения с учётом соответствия результатов расчётов с данными измерений представляют несомненную **практическую ценность** для проектирования и оптимизации горелочных устройств, а также для апробации моделей и программного обеспечения. Результаты работы достаточно полно опубликованы в профессиональных изданиях (в том числе из перечня ВАК) и представлены на профильных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Заключение. С учётом изложенного считаю, что содержание диссертации Бадерникова Артема Витальевича «Модифицированный метод расчета горения в вихревых противоточных горелочных устройствах» **соответствует** специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по техническим наукам, работа **соответствует** требованиям п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней (утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842) предъявляемым ВАК Министерства образования и науки РФ к кандидатским диссертациям, а её автор **заслуживает** присуждения степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен»

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Снегирёв Александр Юрьевич

23 мая 2019 г.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29

Рабочий телефон 8 (812) 294-42-76

e-mail: a.snegirev@phmf.spbstu.ru

