

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Ширяевой Анны Александровны** «**Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

В последние годы исследования и разработки высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) стали приоритетным направлением развития авиации. Эти аэрокосмические транспортные средства имеют революционное применение в национальной безопасности, в освоении космоса как многоразовые этапы доступа к низкой околоземной орбите, а также в коммерческой авиации для быстрой перевозки авиапассажиров на большие расстояния. Центральным физическим процессом, позволяющим ЛА достигать больших сверхзвуковых скоростей, является горение в высокоскоростных турбулентных потоках. Имеющиеся физико-математические модели этого процесса в камере сгорания ЛА должны описывать смешение топлива и окислителя, воспламенение, стабилизацию и срыв горения. Для этого в эти модели включено описание трехмерного турбулентного смешения при наличии химически реагирующего потока, течения с отрывными зонами в местах подачи топлива, теплопереноса в стенку камеры сгорания, эффекты сжимаемой турбулентности, взаимодействие скачков уплотнения и волн разряжения между собой, с пограничными слоями и со слоями смешения. Большого внимания заслуживает описание и учет взаимодействия турбулентности и горения (TCI – Turbulence Combustion Interaction) не только традиционно рассматриваемых режимах диффузионного и гомогенного горения, но и при смешанных режимах горения, когда имеются области с разными механизмами стабилизации горения. Разработка численных методов и создание физико-математических моделей для описания высокоскоростных течений при наличии турбулентного горения является очень актуальной задачей, которой интенсивно занимаются ведущие специалисты турбулентного горения у нас в стране и за рубежом. Расчетные исследования, проводимые с использованием таких методик, позволяют существенно сократить затраты на дорогостоящие и сложные экспериментальные исследования течения и горения в камерах сгорания ЛА. **В этой связи актуальность выбранной темы исследований не вызывает сомнений.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Общий объем составляет 206 страниц основного текста и 11 страниц приложений. Список используемых источников содержит 207 наименований. В работе содержится 105 иллюстраций.

Во введении автором обоснована актуальность темы и направления исследования, сформулированы основные цели и задачи, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации. Приведен обзор литературы по теме диссертации.

В Главе 1 описаны математические модели и методы, используемые автором для описания турбулентного горения. Приведена система уравнений Рейнольдса (RANS) с использованием осреднения Фавра для нестационарных трехмерных турбулентных течений многокомпонентного газа с неравновесными химическими реакциями. Для решения этой системы уравнений применяется конечно-объемный численный метод 2-го порядка точности по всем переменным. Уравнения замкнуты двухпараметрической дифференциальной моделью турбулентности с учетом поправки на сжимаемость (рассматриваются модели $q-\omega$ Куокли и SST- $k-\omega$ Ментера, алгебраическая поправка на сжимаемость турбулентной вязкости Деша). Для описания горения используется ряд редуцированных химических кинетических схем (для водорода и метана). Автором добавлены аппроксимации дополнительных уравнений и моделей для описания TCI. Основное внимание уделено двум различным классам моделей взаимодействия турбулентности и горения – моделям микроламинарных пламен (flamelets) и моделям частично перемешанного реактора PaSR (Partially Stirred Reactor). Новым в этой главе является предложенный автором диссертации комбинированный метод для расчета смешанных режимов турбулентного горения. При этом модели взаимодействия турбулентности с горением используются только для оценки химических источников членов в определяющей системе уравнений. Отметим, что смешанные режимы турбулентного горения характерны для реальных камер сгорания. Автором были проанализировано физическое обоснование уравнений модели PaSR и выбран устойчивый численный алгоритм этой жесткой системы уравнений. В последнем разделе главы дается физико-математический анализ проблемы «динамического равновесия», обнаруженного в расчетах, предлагается способ решения этой проблемы. В Приложении приводится математическое обоснование единственности стационарного состояния реагирующей смеси газов, совпадающего с термодинамически равновесным состоянием.

Глава 2 посвящена использованию рассматриваемых в диссертации классов моделей TCI для описания классических экспериментов по сверхзвуковому турбулентному горению. В начале главы представлена авторская разработка расчетного модуля ZEUS-S3pp и программная реализация разработанного автором метода в модуле zFlare. Перечислены тестовые расчеты без применения моделей TCI, которые использованы автором для проверки работоспособности этих программ. Сравнение результатов расчетов с экспериментом A.D. Cutler et al. и результатами расчетов других авторов показал, что качество описания турбулентного переноса соответствует мировому уровню. В диссертации было проведено сопоставление результатов расчетов с классическими экспериментальными исследованиями по сверхзвуковому турбулентному горению водорода в воздухе, отличающимися предельно простой геометрией течения и наличием обширных данных по температуре и составу газа (J.S. Evans et al. и M.C. Burrows, A.P. Kurkov). Расчетное моделирование проводилось без учета TCI и с учетом TCI на основе моделей flamelet (с различными назначенными PDF – β – функция и Гаусс) и PaSR. Оказалось, что обе модели учета TCI не позволяют получить существенного улучшения совпадения расчетных и экспериментальных данных. Автору, однако, удалось существенно улучшить результаты расчета без применения моделей TCI за счет уточнения описания различных гидродинамических факторов (учет трехмерности течения, теплообмена на стенке и т.д.). Применение комбинированного метода, предложенного автором диссертации и основанного на модели горения flamelet, выявило многочисленные недостатки этой модели. Поэтому, в последующих расчетных исследованиях использовались только различные варианты модели PaSR. Расчеты по модели PASR позволили выявить механизм стабилизации горения в эксперименте T.S. Cheng по горению в соосных струях топлива и окислителя, который объясняет слабый эффект от учета взаимодействия турбулентности с горением в сверхзвуковом потоке. Оказалось, что турбулентность в основном подготавливает смесь, но высокоскоростной поток уносит смесь из области турбулентного перемешивания, поэтому развитие горения определяется не пульсациями скалярных параметров потока, а локальными параметрами и газодинамической структурой течения.

Глава 3 посвящена валидации моделей учета TCI (метод PASR) и метода расчета на тестовой задаче, в которой взаимодействие турбулентность – горение могло проявиться существенным образом. Был выбран классический эксперимент, выполненный в ONERA (Франция). Дозвуковое горение заранее перемешанной смеси метана и воздуха осуществлялось в канале с обратным уступом. Расчеты проводились без учета TCI и с использованием методов EPaSR и GPaSR (соответственно, расширенная и обобщенная

модель реактора частичного перемешивания). Последняя модель применялась в расчетных исследованиях впервые. Примененные в диссертации расширенная и обобщенная модели реактора частичного перемешивания улучшили согласование с экспериментом в области существенного проявления взаимодействия турбулентности с горением по сравнению с квазиламинарным расчетом. Существенное влияние турбулентности на средние скорости химических реакций наблюдается только в области волнового распространения пламени, но не в области самовоспламенения возле обратного уступа, где основную роль играет нагрев потока за счет турбулентной диффузии тепла из зоны возвратного течения. Обобщенная модель впервые применена на практике и оказалась эффективнее расширенной на 10% по времени счета.

В **Главе 4** разработанные методы и программы расчета применены к описанию трехмерной реальной высокоскоростной камеры сгорания на водородном топливе (международный проект HEXAFLY – INT). С использованием квазиламинарного подхода (без учета TCI) удалось получить удовлетворительное согласование с экспериментальными данными по распределению давления. Применение комбинированного метода на базе моделей EPaSR не позволило улучшить совпадение с экспериментом. Физический анализ течения, проведенный автором работы, показал, что, как и в простых конфигурациях со сверхзвуковым горением, основное тепловыделение происходит в областях сверхзвукового или трансзвукового течения. Таким образом, во всех рассмотренных задачах с преимущественно сверхзвуковым горением учет влияния турбулентность-горение оказался меньшим, чем учет влияния различных газодинамических особенностей течения (неоднородность течения в подводящих каналах, нарастание пограничных слоев на боковых стенках канала, ударно-волновая структура сверхзвукового потока, особенности теплообмена на стенках).

В **заключении** изложены основные выводы и рекомендации, перспективы дальнейшей разработки тематики, разработанной в данной диссертации. Используемая автором методология расчета высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения достаточно успешно продемонстрирована и может быть применена для широкого класса задач, ориентированных на исследование течений в камерах сгорания ЛА.

Достоверность результатов обосновывается сопоставлением полученных численных результатов с опубликованными в научной литературе детальными экспериментальными данными и расчетами других авторов; использованием компьютерных программ, протестированных на большом наборе задач, охватывающих рассматриваемые в диссертации

физические эффекты; проверкой сходимости численных решений по шагу расчетной сетки. Большое внимание уделено согласованию с экспериментальными данными результатов расчетов по нескольким, отражающим влияние разных физических факторов, параметрам течения. В диссертации приведено математическое обоснование единственности стационарного состояния реагирующей смеси газов, совпадающего с термодинамически равновесным состоянием системы.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

- 1). Впервые разработан и реализован комбинированный метод расчета смешанных режимов горения. При этом модели взаимодействия турбулентности с горением используются только для оценки химических источниковых членов в уравнениях движения газа.
- 2). Реализован в программе и применен к решению тестовых и практических задач новый метод учета взаимодействия турбулентности с горением - обобщенная модель реактора частичного перемешивания.
- 4). Предложено и реализовано оригинальное граничное условие при моделировании инъекции из отверстия при использовании расчетной сетки, не согласованной с формой этого отверстия.
- 5). Объяснено не физическое “динамическое” равновесие, возникающее при расчете реагирующих течений с использованием многостадийных кинетических схем.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертации:

- 1). Установлены границы области применимости метода назначенной функции плотности вероятности при описании течений в высокоскоростных камерах сгорания.
- 2). Для классических тестов по сверхзвуковому горению, широко используемых при исследовании моделей взаимодействия турбулентность-горение, показана существенная роль описания газодинамических эффектов (ударно-волновая структура течения, теплообмен на стенках канала, вытесняющее действие пограничных слоев).
- 3). На основе модельной системы уравнений и на основе расчетов классических тестов дан сравнительный анализ различных вариантов метода реактора частичного перемешивания. Рекомендовано использовать расширенную и обобщенную модели реактора частичного перемешивания, которые учитывают предысторию течения.
- 4). Дано объяснение не физического “динамического” равновесия, предложен способ его устранения и дано доказательство получения физически корректного решения при использовании этого способа.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные физико-математические модели и численные методы реализованы в программных модулях и могут быть применены для численного моделирования камер сгорания ЛА, а также для проектирования силовых установок ЛА.

Личный вклад соискателя:

- 1). Разработка и настройка всех новых элементов метода;
- 2). Проведение всех расчетов и физический анализ их результатов;
- 3). Математический анализ проблемы “динамического равновесия”;
- 4). Разработка расчетного модуля ZEUS-S3pp и программная реализация разработанного метода в модуле zFlare.

Результаты работы прошли **апробацию** на 16 международных и отраслевых конференциях. Основные результаты диссертационной работы с необходимой полнотой отражены в 20 печатных работах, в том числе в 4 изданиях, рекомендованных ВАК.

В качестве **замечаний** к представленной диссертационной работе следует отметить:

1. В Главах 2 и 4 рассматриваются сверхзвуковые течения газа, с существенными проявлениями эффектов сжимаемости. Однако при использовании модели турбулентности $q-\omega$ применяется не достаточно обоснованная модель для учета эффектов сжимаемости Дэша. В настоящее время чаще всего для этих целей используются поправки к скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (дилатационная диссипация и дилатация – давление, аппроксимируемые в виде зависимости от турбулентного числа Маха). Указанный недочет может привести к искажению результатов расчетов.
2. В работе используются сильно упрощенные модели химической кинетики. Так, для описания горения водорода в воздухе использованы редуцированные кинетические механизмы Моретти и Давиденко, не содержащие компонентов HO_2 и H_2O_2 (при низких температурах), играющие важную роль в процессе самовоспламенения. При описании дозвукового турбулентного горения метана в воздухе использована кинетическая схема, состоящая из нескольких глобальных реакций. В последние годы в России и за рубежом появился целый ряд исследований, свидетельствующих о существенном влиянии кинетики на результаты расчетов сверхзвуковых турбулентных течений с горением.

3. Автор никак не комментирует необычный результат, полученный в Главе 3 (задача о горении в канале с обратным уступом): упрощенная модель турбулентного горения (GPaSR) дала меньшее расхождение с экспериментом, чем более точная модель EPaSR, которая напрямую описывает эффекты конвективного и диффузионного переноса "тонких структур" в моделях класса PaSR.

4. В задаче о горении в канале с обратным уступом (Глава 3) не учет теплопереноса в стенку камеры сгорания при постановке граничного условия на стенке для температуры может достаточно сильно изменить не только температуру вблизи стенки, но и все поле температуры в камере сгорания.

5. Расчетная сетка, которая использовалась для моделирования эксперимента с проточным трактом высокоскоростной камеры сгорания на водородном топливе (HEXAFLY- INT), является слишком грубой для описания столь сложного течения. Это может быть одной из причин заметного отклонения результатов расчета от экспериментальных данных для этой камеры сгорания.

6. Необходимо отметить, что в диссертации нет ссылок на работы известного ученого, выдающегося специалиста в области турбулентности и турбулентного горения В.Р. Кузнецова, впервые в мире математически обосновавшего теорию микроламинарных пламен (тонкого фронта пламени, 1982 г.). Позже, аналогичные результаты были получены и опубликованы известным немецким ученым Питерсом (1984 г.). Сейчас эта модель (или различные ее модификации) является самой распространенной моделью в мире при описании диффузионного горения и горения заранее перемешанной смеси при больших числах Дамкелера и малых числах Карловитца.

Указанные замечания, однако, не носят принципиального характера и никак не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертация представляет собой завершенное актуальное научное исследование, выполненное автором самостоятельно, на высоком уровне и полностью соответствует паспорту специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы». Все научные положения и выводы, содержащиеся в диссертации, обоснованы. Все представленные результаты являются новыми и обладают высокой степенью достоверности, которая обеспечена детальным сопоставлением с имеющимися экспериментальными данными и расчетными исследованиями других авторов. Материал диссертации изложен логично и

Диссертация Ширяевой Анны Александровны «Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса» соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Ведущий научный сотрудник
ФГУП «Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова»,
кандидат физико-математических наук

Государственный научный центр федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»,
111116, город Москва, Авиамоторная улица, 2.
e-mail: lebedev@ciam.ru
<http://www.ciam.ru>
тел. +7 (495)362-93-70

Подпись Лебедева Александра Борисовича заверяю - ученый секретарь института
ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»,
доктор экономических наук, доцент

Джамай Екатерина Викторовна
29 декабря 2018 г.

