

УТВЕРЖДАЮ



Заместитель Генерального Директора

ФГУП "ЦАГИ"

С.В. Ляпунов

2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного унитарного предприятия
"Центральный аэрогидродинамический институт
имени профессора Н.Е. Жуковского" (ФГУП "ЦАГИ")

Диссертация "Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса", представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – "Механика жидкости, газа и плазмы", выполнена в отделе вычислительной аэродинамики Отделения аэродинамики силовых установок летательных аппаратов Федерального государственного унитарного предприятия "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского" (ФГУП "ЦАГИ"). Соискатель – Ширяева Анна Александровна в 2009 г. окончила факультет аэромеханики и летательной техники Московского физико-технического института по специальности "Прикладные математика и физика", а в 2013 г. – очную аспирантуру ФГУП "ЦАГИ". С 2009 г. по настоящее время А.А. Ширяева работала в отделе вычислительной аэродинамики Отделения аэродинамики силовых установок летательных аппаратов ФГУП "ЦАГИ" в должности младшего научного сотрудника. Научный руководитель рассматриваемой диссертации – д.ф.-м.н. по специальности 01.02.05 – "Механика жидкости, газа и плазмы", заместитель начальника лаборатории "Исследования и разработки физических моделей и численных технологий описания режимов горения в двигателях летательных аппаратов" ФГУП "ЦАГИ" Власенко Владимир Викторович.

СЛУШАЛИ:

Доклад Ширяевой А.А. по законченной диссертационной работе на тему "Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – "Механика жидкости, газа и плазмы".

По итогам обсуждения было принято следующее заключение.

I. Актуальность темы исследования и полученные результаты.

Диссертационная работа А.А. Ширяевой представляет собой актуальное исследование в области механика жидкости, газа и плазмы (специальность 01.02.05). Работа выполнялась в отделе вычислительной аэродинамики Отделения аэродинамики силовых установок летательных аппаратов ФГУП "ЦАГИ".

Актуальность темы исследования определяется тем, что проведение экспериментальных исследований газовой динамики и горения в камерах сгорания высокоскоростных ПВРД требует больших финансовых затрат и сталкивается с множеством технических трудностей, которые препятствуют достоверному определению совокупности необходимых характеристик. Поэтому важную роль играют расчетно-теоретические исследования процессов горения в условиях больших скоростей потока и смешанных режимов горения в камерах сгорания. Остро стоит проблема создания физико-математических моделей, корректно описывающих смешение топлива и окислителя, воспламенение, стабилизацию и срыв горения. Стоит отметить важность правильного описания взаимодействия турбулентности и горения и неоднозначность в выборе оптимального подхода при моделировании высокоскоростных течений с тепловыделением. Особую трудность представляют смешанные режимы горения, в которых есть области с разными механизмами стабилизации пламени. Разработка вычислительных моделей для описания высокоскоростных течений с турбулентным горением и соответствующих численных методов является в настоящее время весьма актуальной задачей.

Автором решена задача, которая имеет важное научное и практическое значение: разработан, обоснован, реализован в компьютерном коде и валидирован метод описания высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения, ориентированный на исследования течений в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей на основе трехмерных уравнений Рейнольдса. На основе этого метода выполнен анализ влияния взаимодействия турбулентности с горением на структуру пламени в областях преимущественно сверхзвукового течения.

Предложен комбинированный метод учета взаимодействия турбулентности с горением, позволяющий рассчитывать смешанные режимы турбулентного горения. В ходе разработки этого метода выявлены существенные недостатки известной модели микроламинарных пламен с предписанной функцией плотности вероятности, ограничивающие ее применимость для описания течений в высокоскоростных камерах сгорания.

Доказано, что обнаруженное в расчетах “динамическое равновесие” реагирующей смеси газов является нефизичным, и предложен способ его устранения. Доказано, что при этом стационарное состояние единственно и соответствует истинному термодинамическому равновесию.

При численном моделировании классических экспериментов по сверхзвуковому горению учет взаимодействия турбулентности с горением на основе моделей двух различных классов (микроламинарных пламен и реактора частичного перемешивания) не позволил приблизиться к экспериментальным данным. Автором выявлен 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.

Однако при более низких скоростях турбулентность может оказывать существенное влияние на скорости химических реакций. На основе экспериментальных данных по горению в дозвуковом потоке произведена настройка и сопоставление нескольких моделей взаимодействия турбулентности с горением, относящихся к классу реактора частичного перемешивания. Примененные в диссертации расширенная и обобщенная модели реактора частичного перемешивания Сабельникова В.А. улучшили согласование с экспериментом в области существенного проявления

взаимодействия турбулентности с горением по сравнению с квазиламинарным расчетом. Обобщенная модель впервые применена на практике и оказалась эффективнее расширенной на 10% по времени счета. Выявлен смешанный механизм стабилизации горения в эксперименте с дозвуковым горением в камере сгорания с обратным уступом. 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.

Во всех рассмотренных задачах с преимущественно сверхзвуковым горением (включая камеру сгорания HEXAFLY-INT) вклад различных газодинамических эффектов (неоднородность течения в подводящих каналах, нарастание пограничных слоев на боковых стенках канала, ударно-волновая структура сверхзвукового потока, особенности теплообмена на стенках) является сопоставимым или более существенным по сравнению с вкладом взаимодействия турбулентности с горением.

II. 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 все рассматриваемые в диссертации физические эффекты; проверкой сходимости численных решений по шагу расчетной сетки. Особое внимание в диссертации уделяется согласованию с экспериментом результатов расчетов по нескольким параметрам течения, отражающим влияние разных физических факторов. В диссертации дано строгое математическое доказательство теоремы о единственности стационарного состояния реагирующей смеси газов, совпадающего с термодинамически равновесным состоянием.

III. 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 источников членов в уравнениях движения газа.

2. Новый метод учета взаимодействия турбулентности с горением (обобщенная модель реактора частичного перемешивания – Generalized PaSR) реализован в программе и применен к решению тестовых и практических задач.

3. Впервые дан сравнительный физический анализ результатов применения различных моделей взаимодействия турбулентности с горением.

4. Сформулировано и реализовано оригинальное граничное условие для моделирования инъекции из отверстия при использовании сетки, не согласованной с его формой.

5. Обнаружено и объяснено нефизичное “динамическое” равновесие, возникающее при расчете реагирующих течений с использованием многостадийных кинетических схем.

IV. Методы исследования.

Для описания турбулентных течений с горением в диссертации применяется подход, основанный на решении осредненной по времени системы уравнений Навье-Стокса (системы Рейнольдса). Для оценки средних скоростей реакций используется статистический подход, основанный на предписанной функции плотности вероятности. Для численного решения уравнений Рейнольдса используется конечно-объемный метод второго порядка аппроксимации по всем переменным. Стационарные решения получаются методом установления. При решении жестких уравнений химической кинетики применяются методы расщепления по физическим процессам, итерационные методы Ньютона и секущих. Для выбора устойчивых алгоритмов используется анализ на основе модельного уравнения. При доказательстве невозможности “динамического равновесия” использован принцип независимого протекания химических реакций.

V. Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертации заключается в следующем:

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 валидации и настройке моделей взаимодействия

турбулентности с кинетикой, показана существенная роль корректного 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 нефизичного “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 физические модели и численные методы реализованы в программных модулях и могут быть применены для численного моделирования камер сгорания, для оценки интегральных характеристик воздушно-реактивных двигателей, а также для предварительного проектирования силовых установок летательных аппаратов и сопровождения их испытаний.

VI. Личный вклад соискателя:

- разработка и настройка всех новых элементов метода;
- проведение всех расчетов и физический анализ их результатов;
- математический анализ проблемы “динамического равновесия”;
- разработка расчетного модуля ZEUS-S3pp и программная реализация разработанного метода в модуле zFlare.

VI. Апробация работы. Результаты работы прошли апробацию на 16 международных и отраслевых конференциях. Наиболее значимые из них:

1. EUCASS 2011 (4-8 июля 2011, Россия, г. Санкт-Петербург)
2. Научная конференция по горению и взрыву, организуемая отделом горения и взрыва ИХФ РАН (8-10 февраля 2014 г., Россия, г. Москва)
3. Space Propulsion 2014 (19-22 мая 2014 г., Koln, Germany)

4. ICAS 2014, 7–12 сентября 2014 г. (Россия, г. Санкт-Петербург)
5. 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference (16 - 20 June 2014, Atlanta, Georgia, USA)
6. EUCASS 2015 (29 June - 3 July 2015, Krakow, Poland)
7. 20th AIAA International Conference on Spaceplanes, Hypersonic Systems and Technologies (6 - 9 July 2015, Glasgow, Scotland)
8. ICMAR 2018 (13-18 августа 2018, Россия, г. Новосибирск)
9. Видеосеминар по аэромеханике ЦАГИ — ИТПМ СО РАН — СПбПУ — НИИМ МГУ — ОИВТ РАН (18 сентября 2018 г.)

VII. Полнота изложения материала диссертации в публикациях.

Основные результаты диссертационной работы с необходимой полнотой отражены в 20 печатных работах, в том числе в 4 изданиях, рекомендованных ВАК:

1. *Ширяева А. А.* О стационарном состоянии в потоке реагирующей смеси газов //Химическая физика. – 2010. – Т. 29. – №. 6. – С. 21-30.
2. *Vlasenko V., Shiryayeva A.* Numerical simulation of non-stationary propagation of combustion along a duct with supersonic flow of a viscid gas //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2013. – Т. 227. – №. 3. – С. 480-492.
3. *Vlasenko V., Shiryayeva A.* Effect of viscosity on a propagation of strong compression wave in a cylindrical duct with damping device //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2013. – Т. 227. – №. 3. – С. 493-501.
4. *Ширяева А.А.* Применение модели реактора частичного перемешивания для учета взаимодействия турбулентности и горения на основе уравнений Рейнольдса // Ученые записки ЦАГИ.–2018. – Т.48 – №8.

ПОСТАНОВИЛИ:

Диссертация А.А. Ширяевой “Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса” представляет собой самостоятельно выполненную научно-квалификационную работу, в которой решена задача, которая имеет важное научное и практическое значение: разработан, обоснован и апробирован метод описания высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения, ориентированный на исследования течений в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей на основе трехмерных уравнений Рейнольдса. На основе этого метода выполнен анализ влияния взаимодействия турбулентности с горением на структуру пламени в областях преимущественно сверхзвукового течения. Во всех рассмотренных задачах с преимущественно сверхзвуковым горением (включая высокоскоростную камеру сгорания HEXAFLY-INT) вклад различных газодинамических эффектов (ударно-волновая структура течения, теплообмен на стенках канала, вытесняющее действие пограничных слоев) является сопоставимым или более существенным по сравнению с вкладом взаимодействия турбулентности с горением. Выявлены механизмы стабилизации горения в рассмотренных задачах. Расширенная и обобщенная модели реактора частичного перемешивания улучшили согласование расчета с экспериментом в области существенного проявления взаимодействия турбулентности с горением по сравнению с квазиламинарным расчетом. Обобщенная модель впервые применена на практике и оказалась эффективнее расширенной модели по времени счета.

Область исследований выполненной А.А. Ширяевой диссертационной работы соответствует паспорту специальности 01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”, а сама работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Рекомендовать диссертационную работу Ширяевой Анны Александровны “Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса” к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы – в Диссертационном совете Д 002.073.03 при ФИЦ ИУ РАН.

Заключение принято на расширенном заседании научно-технического совета (НТС) Отделения аэродинамики силовых установок летательных аппаратов (ННО-1) Федерального государственного унитарного предприятия "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского" (ФГУП "ЦАГИ").

Присутствовали на заседании 25 членов НТС ННО-1 ЦАГИ (из 41 члена по списку). Результаты голосования: единогласно «за» (протокол № 109 от 12 октября 2018 года).

Председатель НТС ННО-1 ЦАГИ

Заместитель начальника комплекса аэродинамики
и динамики полета ЛА – начальник
Отделения аэродинамики силовых
установок летательных аппаратов (ННО-1)



к.т.н. А.Ф. Чевагин

Ученый секретарь НТС ННО-1 ЦАГИ



к.т.н. В.О. Акинфиев