

На правах рукописи



Ширяева Анна Александровна

**Моделирование высокоскоростных течений
со смешанными режимами турбулентного горения
на основе трехмерных уравнений Рейнольдса**

Специальность: 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии
«Центральный аэрогидродинамический институт
имени профессора Н.Е. Жуковского»

Научный руководитель:

Власенко Владимир Викторович,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГУП «Центральный аэрогидродинамический
институт имени профессора Н.Е. Жуковского»,
зам. начальника лаборатории.

Официальные оппоненты:

Молчанов Александр Михайлович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
профессор;

Лебедев Александр Борисович,
кандидат физико-математических наук,
ФГУП «Центральный институт авиационного
моторостроения им.П.И. Баранова»,
ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

ФГБУН «Институт теоретической и прикладной
механики им. С.А. Христиановича» Сибирского
отделения Российской академии наук.

Защита состоится “24” января 2019 года в 15 часов
на заседании Диссертационного совета Д002.073.03 при ФИЦ ИУ РАН по адресу:
119333, Москва, ул. Вавилова, д. 40, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВЦ ФИЦ ИУ РАН по
адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 42, а также на сайте
http://www.frccsc.ru/diss-council/00207303/diss/list/shiryeva_aa.

Автореферат разослан “___” 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.073.03,
доктор физико-математических наук



С.И. Безродных

Общая характеристика работы

Исследование посвящено математическим моделям турбулентного горения в высокоскоростных течениях, ориентированным на расчеты в рамках подхода трехмерных уравнений Рейнольдса (Reynolds Averaged Navier — Stokes equations, RANS) и их реализацию в компьютерных программах. Акцент в работе делается на оценку влияния учета взаимодействия турбулентности и горения (Turbulence – Combustion Interaction, TCI).

Разработка высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) должна стать приоритетным направлением развития авиации на несколько ближайших десятилетий. Ключевой элемент транспортных систем для полета в атмосфере с большими скоростями - высокоскоростной прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД), в котором поток на входе в камеру сгорания в основном является сверхзвуковым.

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.

Степень разработанности темы. Турбулентное горение стало объектом детальных исследований примерно с середины XX века. Много внимания было уделено структуре турбулентного пламени, механизмам смешения и горения. В турбулентном пламени были выделены несколько принципиально различных режимов горения. Разработаны рекомендации по осуществлению горения в

камерах сгорания высокоскоростных ЛА. Предложены различные способы учета взаимодействия турбулентности и горения (TCI): методы моментов, функции плотности вероятности (ФПВ), модели микроламинарных пламен (flamelet), модели реактора частичного перемешивания (Partially Stirred Reactor, PaSR) и др. Вместе с тем, на данный момент разработанные методы учета TCI требуют значительных компьютерных ресурсов, а точность описания течений с турбулентным горением остается довольно низкой. Разработанные методы описания TCI реализованы в коммерческих пакетах вычислительной аэродинамики (ANSYS CFX, FASTRAN и др.), но применение этих методов для решения сложных практических задач требует высокой квалификации вычислителя, глубокого понимания физики течения, умения вторгаться в программу для повышения ее устойчивости и качества.

Цель работы:

1. Разработка и валидация метода моделирования высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса.
2. Применение этого метода к анализу влияния взаимодействия турбулентности с горением на структуру пламени в областях преимущественно сверхзвукового течения.

Решены следующие задачи:

1. Анализ моделей взаимодействия турбулентности с горением и разработка алгоритмов их реализации. Разработка комбинированного метода для расчета смешанных режимов турбулентного горения.
2. Разработка и тестирование программ для описания высокоскоростных течений на основе трехмерных уравнений Рейнольдса.
3. Применение различных моделей взаимодействия турбулентности с горением к описанию классических экспериментов по турбулентному горению.
4. Исследование механизмов стабилизации горения. Анализ влияния взаимодействия турбулентности с горением на структуру пламени.
5. Применение разработанного метода к описанию течения в высокоскоростной камере сгорания.

Научная новизна работы состоит в том, что:

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. 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 инжекции 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.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Установлены границы области применимости метода назначеннной плотности вероятности (ФПВ) при описании течений в высокоскоростных камерах сгорания.
2. Для классических тестов по сверхзвуковому горению, широко используемых для валидации и настройки 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 модельных систем 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” реагирующей смеси газов, 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.

Методология и метод 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.

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.

На защиту выносятся:

- новые элементы метода моделирования турбулентных течений вязкого газа с неравновесными химическими реакциями: алгоритмы реализации различных моделей взаимодействия турбулентности с горением и комбинированный метод описания смешанных режимов горения;

- сравнительный анализ различных моделей учета взаимодействия турбулентности с горением на основе модельных систем уравнений и на основе расчета классических тестовых задач;

- анализ механизмов стабилизации горения в классических тестовых

задачах и анализ влияния взаимодействия турбулентности с горением на структуру пламени в областях преимущественно сверхзвукового течения.

Личный вклад автора:

- 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.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует задачам, указанным в паспорте специальности 01.02.05: “Задачей механики жидкости, газа и плазмы является построение и исследование математических моделей для описания параметров потоков движущихся сред в широком диапазоне условий, проведение экспериментальных исследований течений и их взаимодействия с телами и интерпретация экспериментальных данных с целью прогнозирования и контроля природных явлений и технологических процессов, включающих движение текучих сред, а также разработки перспективных космических, летательных и плавательных аппаратов.” В работе анализируются классы задач механики жидкости и газа, соответствующие областям исследований, перечисленным в паспорте специальности: “3) ламинарные и турбулентные течения; 4) течения сжимаемых сред и ударные волны; 8) физико-химическая гидромеханика (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.); 11) пограничные слои, слои смешения, течения в следе; 12) струйные течения. Кавитация в капельных жидкостях; 15) тепломассоперенос в газах и жидкостях; 18) аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.)”.

Апробация работы. Результаты работы прошли апробацию на 16 международных и отраслевых конференциях, в том числе:

- 1) European Conference for Aerospace Sciences 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) International Congress of the Aeronautical Sciences 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) European Conference for Aerospace Sciences 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) Международная конференция по методам аэрофизических исследований (13–18 августа 2018, Россия, г. Новосибирск)
- 9) Видеосеминар по аэромеханике ЦАГИ — ИТПМ СО РАН — СПбПУ — НИИМ МГУ — ОИВТ РАН (18 сентября 2018 г.)

Представленные в диссертации исследования проводились, в том числе, в ходе европейского Проекта HEXAFLY–INT (контракт № ACP3-GA-2014-620327), при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ; были поддержаны грантом РФФИ №14-01-31546 и грантом Министерства образования и науки РФ (договор №14.G39.31.0001).

Структура и объём диссертации. Диссертация включает список обозначений, введение, основной текст из 4 глав, заключение, выводы, 2 приложения и список литературы. Содержание работы изложено на 206 страницах основного текста (включая иллюстрации) и 11 страницах приложений. Список литературы содержит 207 наименований. В работе содержится 105 иллюстраций.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации получены автором лично. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ [1–20], из которых 4 статьи [1–4] помещены в изданиях, рекомендованных ВАК.

Содержание диссертации

Во **Введении** дан обзор источников литературы по теме диссертационной работы. Взаимодействие турбулентности и горения (TCI) связано с влиянием горения на турбулентный перенос и с влиянием турбулентности на осредненные скорости химических реакций. Во многих работах средние значения параметров газа подставляются в формулу для скорости реакции (расчет без учета TCI). Но при этом исключается вклад от турбулентных пульсаций, который может быть существенным. В диссертации рассматриваются математические модели для учета вклада пульсаций в средние скорости реакций.

Рассмотрены экспериментальные данные по турбулентному горению в сверхзвуковом потоке. Особое внимание уделено работам, пригодным для валидации физических моделей. Для этого данные должны включать измерения существенных характеристик – температуры, состава газа и др. Предпочтительны бесконтактные методы измерений. Такие экспериментальные данные можно подразделить на две группы: 1) классическая постановка задачи (предельно простая геометрия течения); 2) модельные камеры сгорания. Ко 2-й группе относится много экспериментов, посвященных изучению течений в условиях камер сгорания высокоскоростных ПВРД. Но течения такого типа осложнены взаимодействием многих физических факторов. Для валидации моделей учета взаимодействия турбулентности и горения (TCI) в настоящей диссертации выбраны три эксперимента первой группы: 1) эксперимент J.S.Evans et al.; 2) эксперимент M. Burrows & A. Kurkov; 3) эксперимент T.S.Cheng et al.

Далее приведены характерные примеры результатов применения другими авторами различных моделей TCI к расчету сверхзвуковых течений. Эти примеры показывают, что современные модели турбулентного горения не обеспечивают достаточного для практики качества предсказания характеристик течений. В частности, до сих пор нет однозначного мнения о роли TCI в течениях с преимущественно сверхзвуковым горением.

Хотя в последнее время широкое распространение получили расчеты на основе подхода LES (Large Eddy Simulation, прямое численное моделирование крупномасштабной турбулентности), во многих случаях подход RANS способен обеспечить сопоставимое или даже более высокое качество решения. Дело в том, что в турбулентном горении существенную роль играет молекулярная молекулярная диффузия на масштабах мельчайших турбулентных вихрей. LES не позволяет опуститься до столь мелких масштабов, поэтому и в LES приходится использовать полуэмпирические модели микросмешения и горения. В настоящей работе течения с горением моделируются только в рамках уравнений RANS.

В **Главе 1** рассматриваются математические модели и методы для описания турбулентного горения. Описана полная система уравнений Рейнольдса (RANS) для нестационарных трехмерных турбулентных течений многокомпонентного вязкого газа (смеси совершенных газов) с неравновесными химическими реакциями. Для решения этой системы используется конечно-объемный численный метод 2-го порядка точности по всем переменным. Для конвективных потоков используется явная схема Годунова — Колгана, для диффузионных –

центрально-разностная схема, для источниковых членов – локально-неявная аппроксимация. Уравнения замкнуты дифференциальной моделью турбулентности (рассматриваются модели q – ω Коукли и SST Ментера, обе с поправками на сжимаемость) и некоторой моделью кинетики. Автором добавлены аппроксимации дополнительных уравнений и моделей для описания TCI.

Даны описание и предварительный анализ различных моделей TCI, а также представлены алгоритмы их численной реализации. Один из наиболее распространенных подходов к моделированию турбулентного диффузионного горения предварительно не перемешанных реагентов – *модель микроламинарных пламен (flamelet)*. При этом подходе зона реакции турбулентного горения представляется совокупностью фрагментов ламинарного пламени, погруженных в турбулентное поле скорости. При ряде упрощающих предположений (в частности, о малости характерных времен смешения и горения про сравнению с временем конвекции) удается отделить сложные вычисления, связанные с химической кинетикой, от расчета турбулентного течения. Перед началом расчетов течения создается библиотека *flamelet*, включающая массовые доли реагирующих компонент Y_i и температуру T как функций переменной смешения z . Эти величины находятся из решения системы уравнений для ламинарных деформированных пламен при всевозможных реализуемых в задаче значениях определяющих параметров: скорости скалярной диссипации на поверхности стехиометрического состава смеси $N^{st} = D(dz/dn)_{st}^2$ и давления в зоне протекания реакций. Это позволяет выразить Y_i и T в виде параметрических зависимостей: $f^{flamelet} = f(z, N^{st}, p)$, где $f = Y_i, T$. Средние значения параметров течения в области полностью развитой турбулентности определяются по формуле:

$$\overline{f^{lib}}(N^{st}, \bar{p}) = \int_0^1 f^{flamelet}(\bar{z}, \overline{N^{st}}, \bar{p}) \text{pdf}(z) dz, \quad (1)$$

где $\text{pdf}(z)$ – функция плотности вероятности реализации различных значений переменной смешения z . В настоящей работе используется предписанная ФПВ – функция заданного вида, чаще всего – ФПВ β -распределения переменной z :

$$\text{pdf}(z) = z^\beta (1-z)^\gamma / \int_0^1 \hat{z}^\beta (1-\hat{z})^\gamma d\hat{z}. \quad (2)$$

Параметры β и γ выбираются так, чтобы обеспечить правильные значения \bar{z} и $\sigma = \overline{z'^2}$ в данном месте течения. Для нахождения полей \bar{z} и σ решаются дополнительные уравнения в частных производных. С учетом перемежаемости

турбулентности, средние значения параметров течения определяются формулой:

$$\bar{f} = \gamma \cdot \bar{f}^{lib} + (1 - \gamma) ((1 - \bar{z}) \cdot f_O + \bar{z} \cdot f_F),$$

где f_O – параметры потока окислителя, f_F – параметры потока топлива, а γ – коэффициент перемежаемости, который означает долю времени существования турбулентного режима в данной точке пространства.

Чаще всего в литературе встречается "классическая модель ФПВ–flamelet", в которой из предварительно рассчитанной библиотеки напрямую определяются средние значения температуры и массовых долей реагирующих компонент газовой смеси. Это позволяет уменьшить количество решаемых уравнений. Но этот подход неприменим к смешанным режимам горения.

Далее рассматривается другой класс моделей учета ТСИ – *модели реактора частичного перемешивания* (PaSR). В них предполагается, что при больших числах Рейнольдса молекулярное перемешивание, теплообмен и химические реакции протекают, главным образом, в тонких структурах, связанных с мельчайшими турбулентными вихрями. Эти структуры считаются гомогенными реакторами, в которых реакция протекает непрерывно. Молекулярная диффузия подводит к тонким структурам свежую смесь из окружающего их пространства, а также отводит от них продукты реакции. Кроме того, из-за молекулярной диффузии происходит теплообмен между тонкими структурами и окружающим пространством. Основными параметрами модели являются объемная доля тонких структур γ^* и характерное время пребывания газа в реакторе τ^* .

В качестве базового варианта модели PaSR рассматривается модель, в которой время реакции в тонких структурах гораздо меньше, чем характерное время среднего течения. Тогда состояние в тонких структурах квазистационарно и описывается алгебраической системой уравнений. Используются следующие выражения для основных параметров модели:

$$\gamma^* = \frac{\tau_{chem}}{\tau_{chem} + \tau^*}; \quad \tau^* = \sqrt{\tau_K \cdot \tau_T}, \quad (3)$$

где $\tau_K \approx \sqrt{\nu/\varepsilon}$ – масштаб Колмогорова, $\tau_T \approx 1/\omega$ – макромасштаб турбулентности (ν, ε, ω – кинематическая вязкость, средняя скорость диссипации турбулентной энергии и характерная частота турбулентных пульсаций), а τ_{chem} – характерный масштаб времени химических процессов. Обычно полагают $\tau_{chem} \approx \delta_L / S_L$, где S_L и $\delta_L \approx \nu / S_L$ – соответственно, скорость и толщина фронта ламинарного пламени.

В работах В.А.Сабельникова и К.Фюрби была предложена «*Расширенная модель PaSR*» (EPaSR), в которой для параметров в тонких структурах решается система дифференциальных уравнений в частных производных, которая учитывает изменение тонких структур во времени и их перенос по пространству. Еще одна модель семейства PaSR, предложенная В.А. Сабельниковым – «*Обобщенная модель PaSR*» (GPaSR) – впервые реализована и применена в настоящей работе. Вместо решения дополнительных дифференциальных уравнений в частных производных вводится дополнительный источниковый член, представляющий собой оценку вклада конвективного переноса.

Рассмотрена модельная задача о замкнутой системе из двух взаимодействующих гомогенных реакторов, один из которых соответствует тонким структурам, а другой – окружающему пространству. Эта задача позволила дать физическую интерпретацию уравнений модели PaSR, найти устойчивые численные алгоритмы реализации этой модели и сравнить различные варианты модели PaSR.

Поскольку метод нацелен на применение к расчету реальных течений в высокоскоростных камерах сгорания, то необходимо, чтобы он мог быть применен в течениях со сменой механизма стабилизации горения, включающих как области турбулентного горения предварительно не перемешанной либо перемешанной смеси, так и области самовоспламенения, когда можно не учитывать TCI. Для описания смешанных режимов горения был разработан *комбинированный метод*. В этом подходе некоторый вариант учета TCI используется только для оценки химических источниковых членов в уравнениях для массовых долей компонент смеси Y_i в области влияния TCI (\overline{SY}_i^{TCI}). В остальных областях источниковые члены вычисляются по средним параметрам течения (\overline{SY}_i^{lam}). Окончательные величины источниковых членов вычисляются как линейная комбинация этих двух предельных случаев с коэффициентами, вычисляемыми по соотношению между характерными временами течения:

$$\overline{SY}_i = c_{TCI} \cdot \overline{SY}_i^{TCI} + (1 - c_{TCI}) \cdot \overline{SY}_i^{lam}(\bar{T}, \bar{Y}, \bar{p}). \quad (4)$$

Рассмотрено два варианта комбинированного метода, которые различаются способом учета TCI. Первый основан на подходе ФПВ вместе с некоторым вариантом модели flamelet. В этом случае

$$\overline{SY}_i^{TCI} = \overline{SY}_i^{pdf}(z, \sigma, \bar{N}^{st}, \bar{p}) = \int_0^1 SY_i(z, \bar{p}, \bar{N}^{st}) P(z) dz, \quad c_{TCI} = \gamma \cdot f(\tau_{chem}, \tau_K, \tau_T). \quad (5)$$

Второй вариант комбинированного метода основан на применении модели

EPaSR для оценки \overline{SY}_i^{TCI} . В этом случае

$$\overline{SY}_i^{TCI} = \gamma^* \cdot \overline{SY}_i^* (T^*, \vec{Y}^*), c_{TCI} = f(\tau_{chem}, \tau^*). \quad (6)$$

Дополнительным результатом работы является исследование проблемы “динамического равновесия”, которая возникает при расчете равновесного состава методом установления. Равновесное состояние реагирующей смеси газов используется в некоторых вариантах моделей flamelet; оно является предельным состоянием развития реагирующих течений в камерах сгорания. Показано, что вместо классического химического равновесия в расчете может быть получено “динамическое” стационарное состояние, при котором источниковые члены SY_i обращаются в нуль, а суммарные скорости индивидуальных реакций $(W_s^f - W_s^b)$ не равны нулю. На рис. 1 для наглядности приводится модельная система

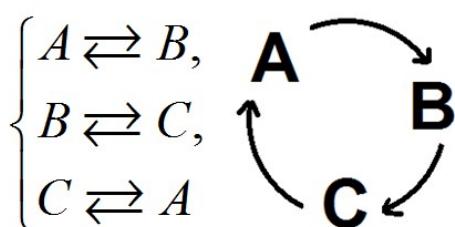


Рис. 1. Модельная
кольцевая цепочка реакций

реакций, которая может образовать замкнутую кольцевую цепочку. Доказано, что “динамическое равновесие” является численным артефактом. Предложен способ его устранения. Дано строгое доказательство, что при применении этого способа реализуется единственное решение — классическое химическое равновесие.

Глава 2 посвящена тестовым расчетам и моделированию турбулентных сверхзвуковых струй с горением. В начале представлены программа *S3pp* [7], разработанная автором, и ее более поздняя версия *zFlare* [15], переработанная и дополненная Молевым С.С. Расчетные модули созданы на базе библиотеки *ZEUS* (автор — С.В.Михайлов). Перечислены тестовые расчеты без применения моделей TCI, которые использованы автором для проверки этих программ. В качестве примера подробно рассмотрено моделирование эксперимента A.D. Cutler et al. без горения. Сравнение с экспериментом и расчетами других авторов показывает, что качество описания турбулентного переноса соответствует мировому уровню.

Далее приведены результаты моделирования классических экспериментов по сверхзвуковым турбулентным струям с горением. Автором выполнены расчеты этих течений без учета TCI, а также с помощью разных подходов для учета TCI. Первый набор экспериментальных данных взят из работ J.S.Evans et al. (1978). Исследовалось горение водорода в круглой сверхзвуковой струе, истекающей в спутный сверхзвуковой поток воздуха, содержащего водяной пар (рис. 2).

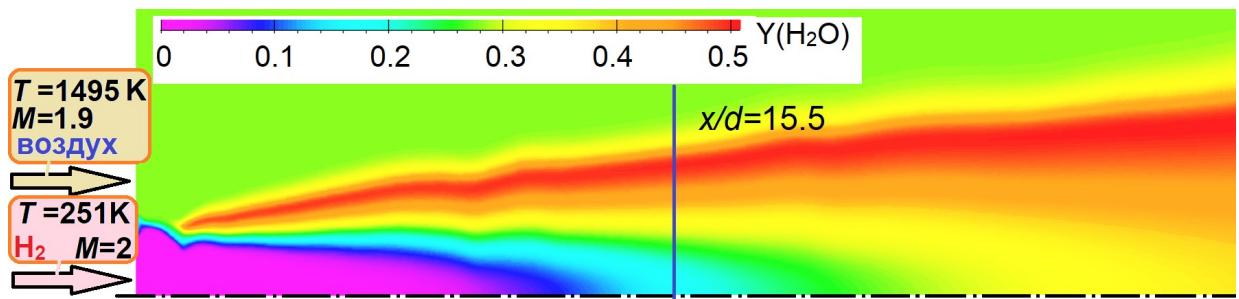


Рис. 2. Параметры эксперимента J.S.Evans et al. (1978) и поле массовой доли H₂O

На рис. 3 данные эксперимента J.S.Evans et al. сопоставляются с результатами расчетов автора и расчетов В.И. Копченова и др. (ЦИАМ, 1996). На рис. 3а представлены данные, полученные без учета TCI. Одна кривая автора получена в расчете с заданными параметрами в начальном сечении струи, а другая — с моделированием течения в соплах для водорода и воздуха. Видно, что существенное влияние на развитие течения, сопоставимое с влиянием TCI, оказывают газодинамические эффекты, связанные с особенностями течения в подводящих каналах — неравномерность профилей параметров, толщина и специфика пограничных слоев. Рис. 3б получен на основе “классической модели ФПВ–flamelet”. Качество результатов такое же, как у других авторов. В расчетах ЦИАМ использовалась ФПВ распределения Гаусса. Налицо заметное отличие от эксперимента. Настройка коэффициентов модели не дает существенного улучшения.

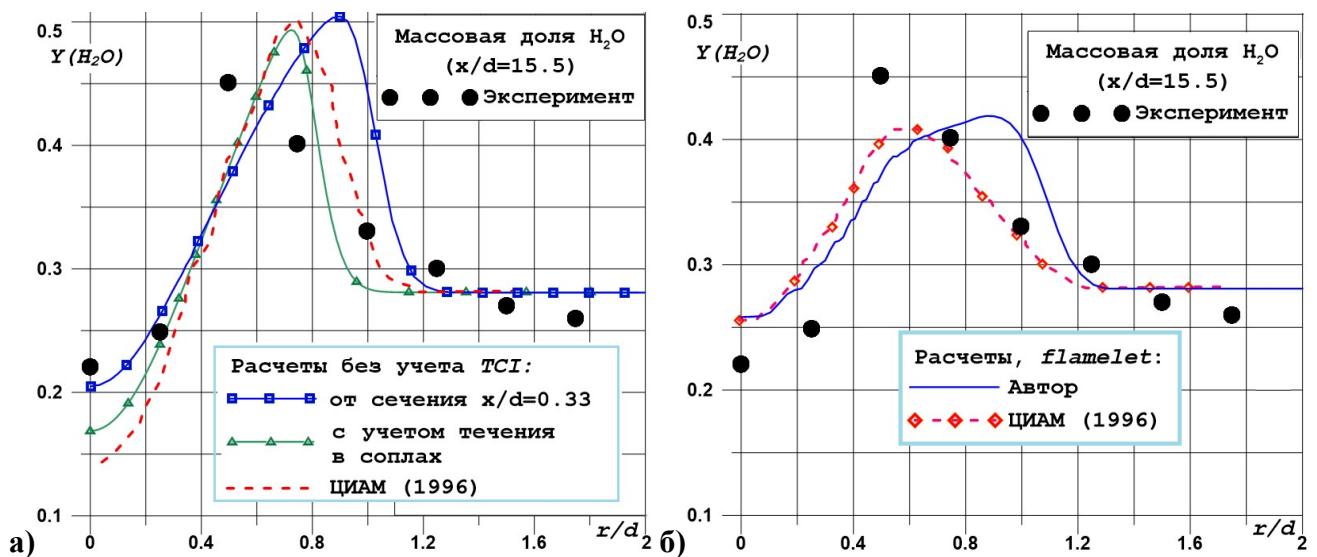


Рис. 3. Поперечное распределение массовой доли H₂O в сечении x/d=15.5 в эксп.

J.S. Evans et al. Сопоставление результатов автора с экспериментальными данными и результатами ЦИАМ (1996): а) без учета TCI и б) по “классической модели ФПВ–flamelet”

Было исследовано влияние формы ФПВ на примере сопоставления распределения Гаусса и β -распределения (рис. 4а). Оказалось, что основное различие в результатах связано не с формой ФПВ, а с различием области

определения ФПВ (по переменным \bar{z} и σ , представляющей в виде $\sigma \leq \sigma_{\max}(\bar{z})$). Для β -*pdf* (2) это ограничение естественным образом вытекает из условий на коэффициенты — $\beta > 0, \gamma > 0$ (рис. 4б). Для ФПВ распределения Гаусса эти условия можно вывести из свойства, известного в математической статистике:

$$0 \leq \bar{z} \pm k\sqrt{\sigma} \leq 1, \text{ где } 1 \leq k \leq 3. \quad (7)$$

Проведен расчет с ФПВ Гаусса, но с искусственно наложенными ограничениями на область определения как для β -*pdf*. Результаты оказались очень близки к полученным с β -*pdf* (рис. 4а).

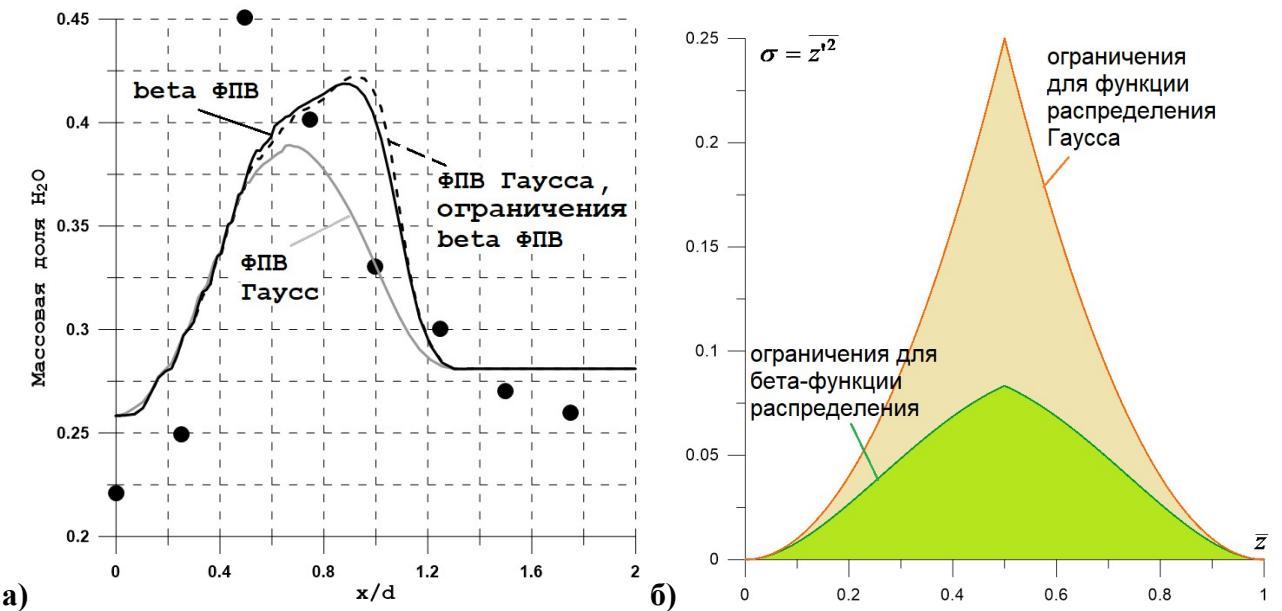


Рис. 4. а) Распределения массовой доли H_2O в сечении $x/d=15.5$ в расчетах эксп. J.S.Evans et al. с “классическим pdf-flamelet” подходом: влияние ФПВ;
б) область определения распределения Гаусса ($k=1$) и бета-функции

Комбинированный метод (4), (5) также проявил ряд недостатков модели flamelet совместно с назначенной ФПВ. Один из них заключается в большой чувствительности модели к значениям величины σ . В частности, при больших σ формула (1) приводит к большому влиянию значений подынтегральной функции, расположенных далеко от локального \bar{z} , что вызывает неустойчивость расчета. Следует отметить, что, полуэмпирическое уравнение для σ может давать нефизичные значения σ , т.к. калибровка эмпирических констант уравнения обычно основана на данных для тонкослойных течений при малых числах Маха. Для устранения нефизичности поведения ФПВ предложено дополнительное ограничение на σ , основанное на (7): $\sigma \leq \sigma_{\max 2} = \min \left\{ \bar{z}^2, (1 - \bar{z})^2 \right\} / k^2$. Численные эксперименты показали, что значение $k = \sqrt{5}$ устраняет неустойчивость.

Классической простотой отличается также эксперимент M. Burrows, A. Kurkov (1971) с горением водорода в плоской пристенной струе (рис. 5). В расчетах этого эксперимента без учета ТСИ и на основе “классической модели ФПВ–flamelet” достигнуто то же качество решения, что и в работе ЦИАМ (1996). Простой способ учета ТСИ не дал приближения к экспериментальным данным.

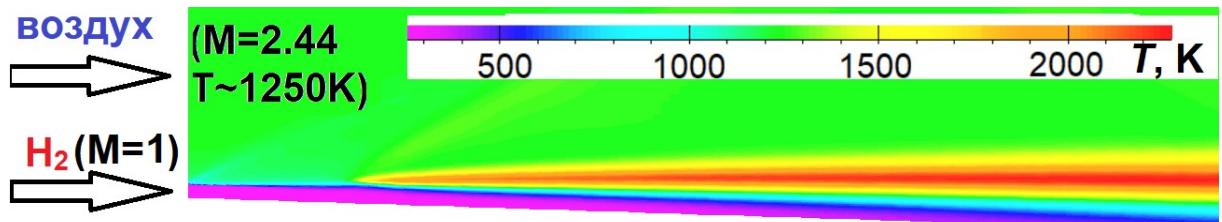


Рис. 5. Параметры эксперимента M. Burrows, A. Kurkov (1971) и поле температуры

Комбинированный метод (4), (5) при моделировании того же эксперимента оказался неприменим в постановке, когда источниковые члены (\bar{SY}_i^{pdf}) вычислялись при использовании стационарной библиотеки flamelet (как в “классической модели ФПВ–flamelet”). Величина $\bar{SY}_{H_2O}^{pdf}$ оказалась слишком мала в области возникновения очага диффузионного пламени, что привело к потуханию. Построена библиотека, основанная на нестационарном решении уравнений flamelet — $f_i^{flamelet} = f_i(z, N^{st}, p_{st}, c)$, где c — переменная полноты протекания реакции, однозначно связанная со временем. Это привело к росту $SY_{H_2O}^{pdf}$ в области появления очага пламени и стабилизации горения.

Лучшие результаты, полученные с использованием комбинированного метода (4),(5), сравниваются с экспериментом и с расчетами без учета ТСИ на рис. 6. При моделировании задачи J.S.Evans et al. (рис. 6а) комбинированный метод сильно изменил решение, но не обеспечил совпадения с экспериментом.

Напротив, при описании течения в камере M.C. Burrows & A.P. Kurkov (рис. 6б) применение нового метода привело лишь к небольшим изменениям. Автору удалось существенно улучшить результаты в расчете без применения моделей ТСИ за счет уточнения описания газодинамической структуры течения. При валидации расчетных моделей этот эксперимент, как правило, рассматривается в двумерной постановке, а авторы пытаются добиться лучшего согласования с экспериментом за счет моделей ТСИ. Чтобы оценить возможный эффект от нарастания толщины пограничного слоя на боковых стенках канала, были проведены трехмерные расчеты, в которых были заданы различные

скорости сужения канала по z -направлению. Найдено сужение, при котором толщина пограничного слоя на верхней и нижней стенках канала резко выросла за счет градиента давления по x и имеющихся скачков, а расчетные профили существенно приблизились к экспериментальным (рис. 6б, черная кривая).

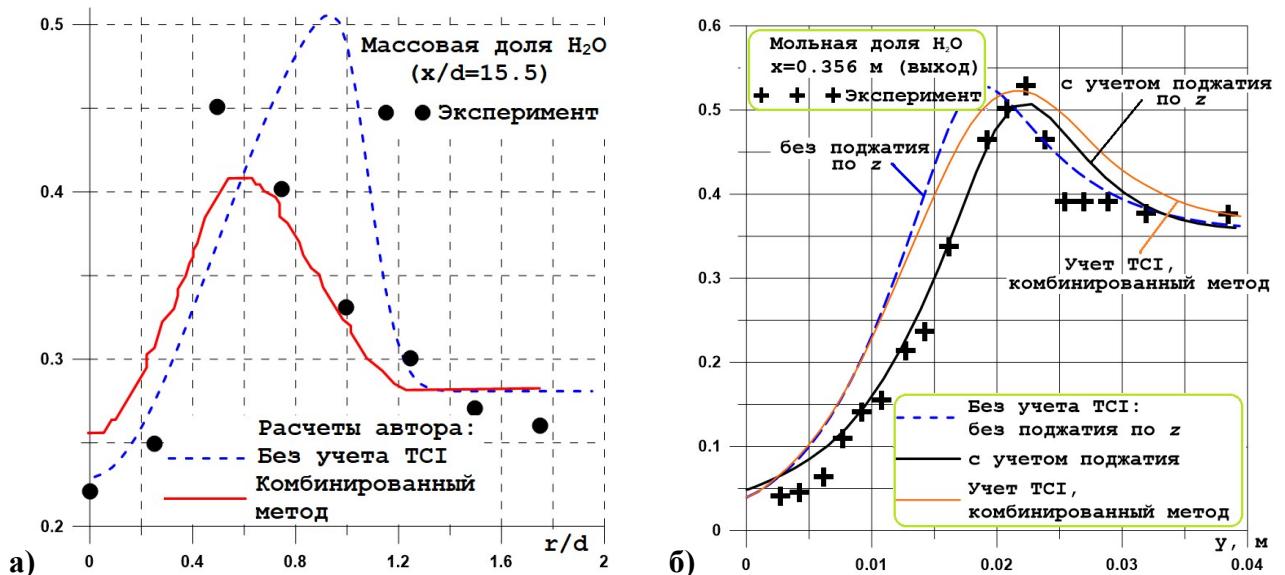


Рис. 6. Результаты расчетов без учета ТСИ и по комбинированному методу.

- а) Профили массовой доли H_2O в сечении $x/d=15.5$ в эксп. J.S. Evans et al.
 б) Профили мольной доли H_2O в выходном сечении в эксп. M.C. Burrows, A.P. Kurkov.
 Чёрная кривая – расчет без ТСИ с учетом поджатия по z

Выявленные недостатки методов назначенной ФПВ совместно с flamelet мотивировали автора обратиться к другому семейству моделей ТСИ – моделям класса PaSR. При применении модели PaSR к моделированию экспериментов J.S.Evans et al. и M.C. Burrows, A.P. Kurkov в зоне горения были получены слишком большие значения объемной доли “тонких структур”. Поэтому поле течения почти не отличалось от поля, полученного без учета ТСИ.

Важный недостаток рассмотренных выше экспериментов — использование контактных методов измерений состава газа (заборы проб). Чтобы избавиться от неточностей этого подхода, далее рассмотрены эксперименты T.S. Cheng et al. (1994), в которых исследовалось истечение сверхзвуковой струи водорода в спутный поток воздуха $M>1$ (рис. 7) и применялись неконтактные методы.

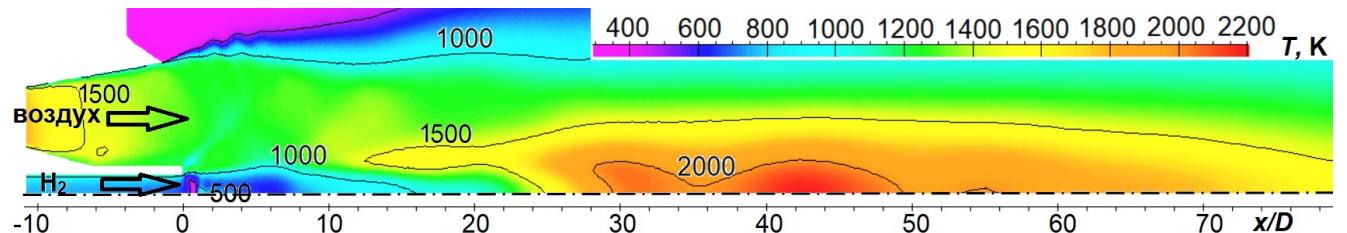


Рис. 7. Численное моделирование эксп. T.S.Cheng et al.: поле температуры (T , К)

Результаты автора без учета TCI по качеству согласования с экспериментом не уступают другим расчетным работам – напр., Y.Moule, 2013, где применялись подходы RANS без учета TCI и LES с учетом TCI (рис. 8а). Применение модели PaSR к расчетам эксперимента T.S.Cheng et al. привело к тем же результатам, что и ранее для двух других простых конфигураций: лишь незначительные отличия от расчета без учета TCI (сиреневая кривая на рис. 8а по сравнению с черной).

Расчеты с фиксированным во всем поле параметром γ^* (рис. 8б) показали, что при $\gamma^* \rightarrow 1$ результаты приближаются к расчету без учета TCI, а при $\gamma^* \rightarrow 0$ – к расчету с выключенными химическими реакциями. При уменьшении γ^* расчетные профили лишь удаляются от экспериментальных.

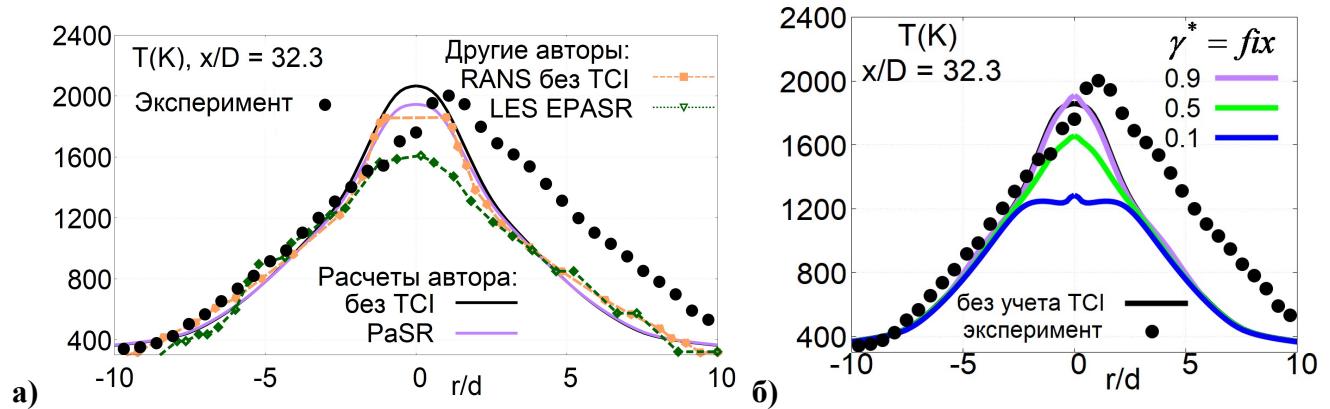


Рис. 8. Температура в эксп. T.S.Cheng et al. в сечении $x/D=32.3$: а) расчеты автора и Y. Moule (2013) без учета TCI и с моделью PaSR; б) расчеты автора, PaSR при $\gamma^* = \text{fix}$

При моделировании описанных выше экспериментов получаются значения γ^* , близкие к единице. Как видно из формулы (3), данный результат означает, что в этом течении смешение происходит быстрее, чем химическая реакция, и развитие горения ближе к квазиламинарному приближению (без существенного влияния турбулентности на средние скорости химических реакций). Наиболее вероятно, что в этих задачах горение развивается в основном по механизму самовоспламенения, а приблизиться к эксперименту возможно путем детального воспроизведения газодинамической структуры течения.

На рис. 9 для половинки струи приведены поля: а) температуры, б) числа Maxa и в) десятичного логарифма скорости тепловыделения ϕ вдоль линий тока, полученные при моделировании эксперимента T.S.Cheng et al. Зона задержки воспламенения доходит до $x/D \sim 7$. Существенный рост ϕ возникает за диском Maxa (область у оси в окрестности $x/D \sim 7.5$): повышение давления и температуры стимулируют выход реакции на стадию интенсивного тепловыделения. Но

температура растет только до 1600 К: выделяющееся тепло идет на разогрев соседних линий тока за счет турбулентной диффузии. Только когда тепловыделение охватывает всю способную к горению область смешения струи, температура продолжает расти и достигает 1800 К. В эксперименте стабилизация пламени наблюдалась на оси при $x/D \sim 25$. В расчетах получена похожие результаты и подобная картина течения.

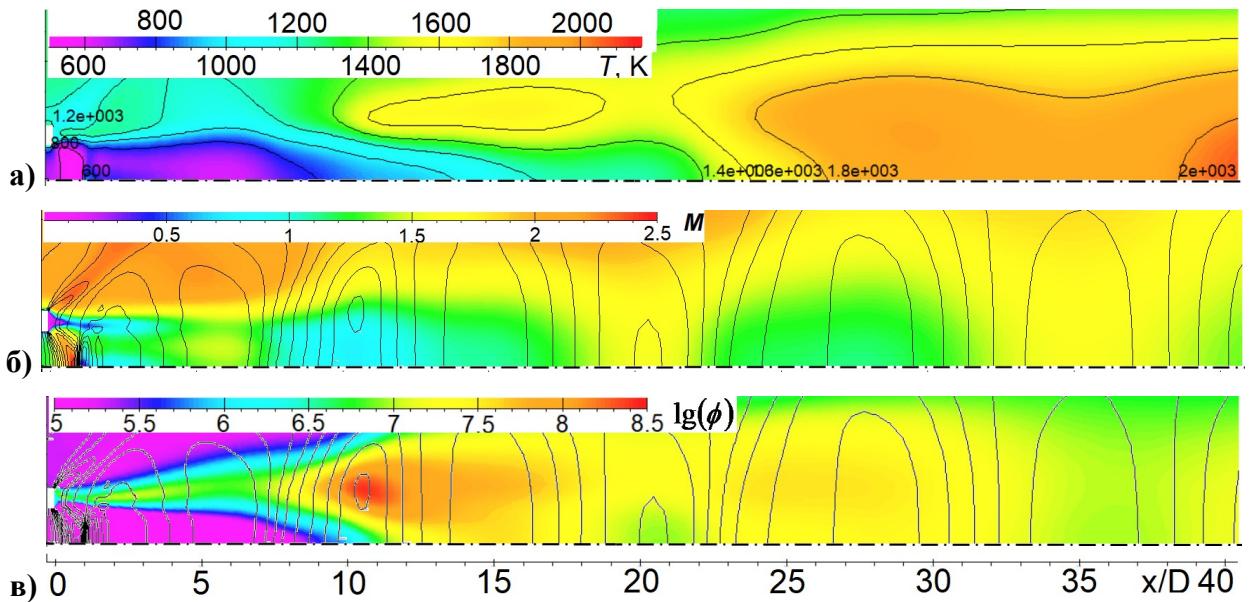


Рис. 9. Численное моделирование эксперимента T.S.Cheng et al.: поля а) температуры (К), б) числа Маха и в) десятичного логарифма скорости тепловыделения ϕ [Дж/(кг·м)] вдоль линий тока. На б) и в) нанесены изолинии давления

В рассмотренном течении большую роль играет турбулентный перенос тепла по пространству. Но вклад турбулентных пульсаций в среднюю скорость химических реакций оказывается незначительным, так как сверхзвуковой поток быстро выносит реагирующую смесь из области турбулентного перемешивания. Развитие горения определяется локальными параметрами течения, т.е. протекает по механизму самовоспламенения. Поэтому модели TCI не дают существенного вклада в структуру течения. Более сильную роль играет диск Маха, вызывающий повышение температуры и давления, а также падение скорости (т.е. увеличение времени пребывания смеси в области с данными параметрами).

Итак, во всех экспериментах со сверхзвуковым горением при простой геометрии течения не было обнаружено существенного вклада от моделей учета TCI. Чтобы убедиться, что этот результат не связан с некорректной реализацией моделей TCI, необходимо было провести валидацию программы на тестовых задачах, в которых TCI проявляется существенным образом. В качестве такого был выбран эксперимент с горением метана в дозвуковом потоке — камера

сгорания с обратной ступенькой, экспериментальные исследования которой проводились в ONERA [P.Magre, Moreau et al., 1988]. Моделированию этого эксперимента с разными моделями учета TCI посвящена **Глава 3**.

На рис. 10 приведены поля средней температуры, полученные в расчетах без учета TCI и с помощью метода EPaSR. Учет TCI привел к заметному изменению картины течения.

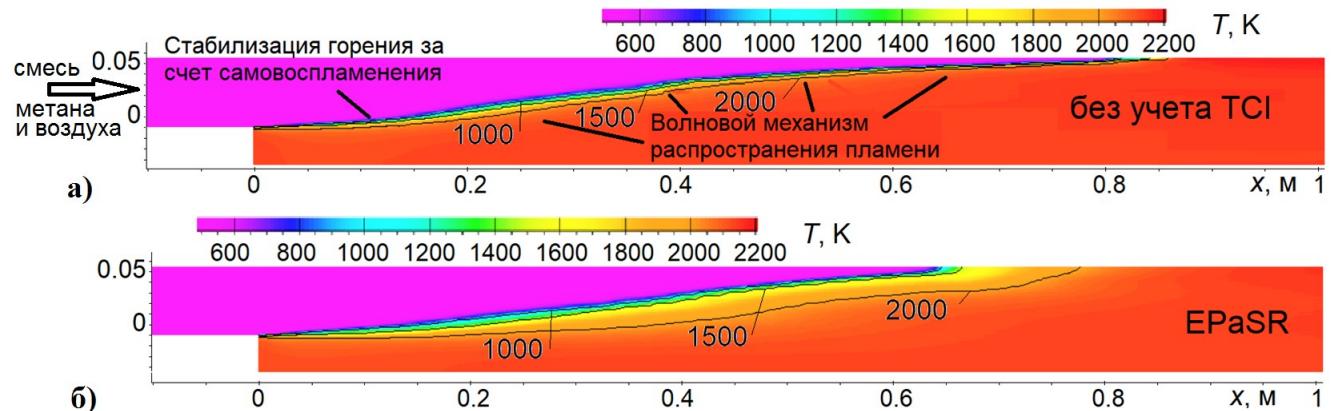


Рис. 10. Моделирование эксперимента P. Magre et al.: поля средней температуры (T , К), полученные в расчетах а) без учета TCI и б) с помощью метода EPaSR

Сопоставление профилей температуры, полученных а) без учета TCI и б) с использованием методов EPaSR и GPaSR, с экспериментальными данными и с расчетами другого автора (N. Petrova, ONERA, 2015) в аналогичной постановке можно видеть на рис. 11. Результаты автора, полученные без учета TCI (рис. 11а), ближе к эксперименту, чем результаты другого автора. Завышение температуры у нижней стенки связано с неточным воспроизведением условий теплообмена.

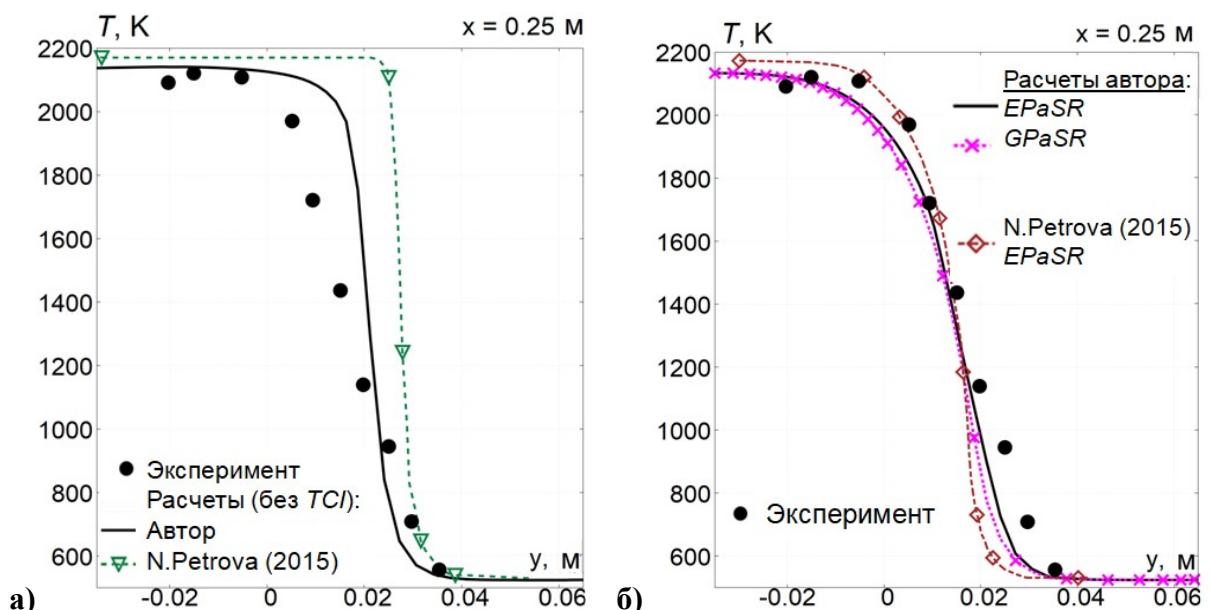


Рис. 11. Распределения температуры в сечении $x=0.25$ м, полученные в расчетах экспериментов P. Magre et al. а) без учета TCI; б) по моделям класса PaSR

Анализ механизма стабилизации горения в этой задаче показал, что в окрестности ступеньки (см. рис. 10) пламя стабилизируется путем самовоспламенения вдоль линий тока благодаря диффузионному потоку тепла от горячей рециркуляционной зоны за уступом. Ниже по течению, в верхней части канала, реализуется волновой механизм стабилизации пламени в стоячей волне горения. Эта волна распространяется по газу за счет турбулентного и молекулярного переноса тепла и наклонена к потоку так, чтобы скорость газа по нормали к потоку была равна скорости волны относительно потока.

Учет TCI с помощью методов GPaSR и EPaSR позволяет обеспечить лучшее согласование с экспериментальными данными в области с волновым механизмом распространения пламени, на который сильно влияют эффекты TCI. Уровень согласования с экспериментом не хуже, чем в расчетах N. Petrova. Таким образом, используемая автором реализация моделей PaSR успешно прошла валидацию.

В Главе 4 разработанные методы и программы применяются к моделированию экспериментальных исследований высокоскоростной камеры сгорания на водородном топливе для гипотетического сверхзвукового гражданского ЛА. Эксперименты были выполнены на высокоэнталпийном стенде Т-131 ЦАГИ в рамках международного проекта HEXAFLY-INT. Камера представляет собой канал с эллиптическими секциями с двумя поясами подачи топлива (рис. 12а). На вход в камеру сгорания поступает воздух, прошедший через огневой подогреватель пламени и обогащенный кислородом. Число Маха в невязком ядре потока $M \sim 2.7$, температура близка к 1200 К, а температура инжектированных струй водорода составляет лишь 163 К.

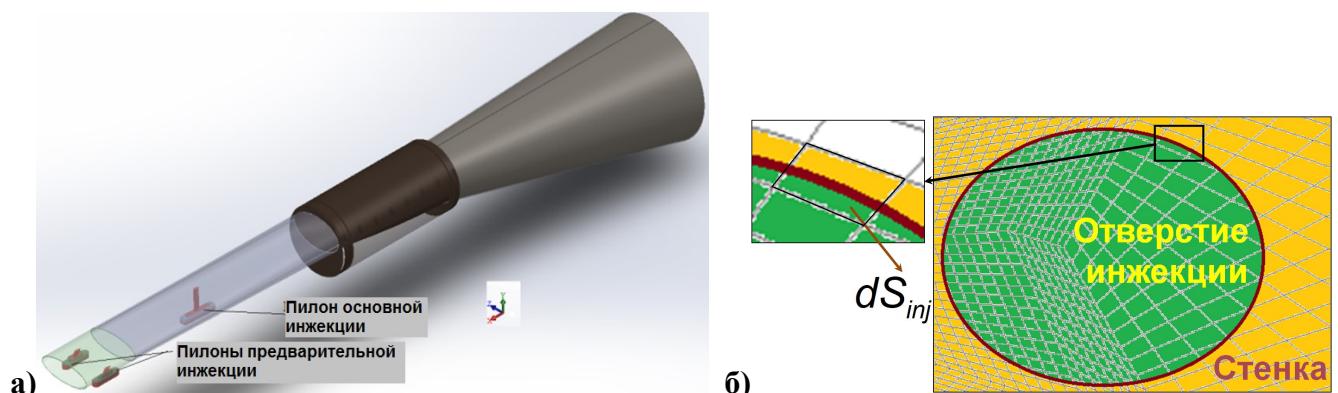


Рис. 12. а) Геометрия модельной камеры сгорания HEXAFLY-INT. Показано положение пилонов для инжекции топлива. б) Границное условие инжекции топлива

Для моделирования подачи топлива при использовании сетки, не согласованной с отверстием, было разработано оригинальное граничное условие

(рис. 12б). Для ячеек, в которых одна часть поверхности приходилась на отверстие, а другая – на твердую стенку, потоки рассчитывались как линейная комбинация потоков, соответствующих параметрам инжекции \vec{F}_i^{inj} , и твердой стенке \vec{F}_i^{wall} : $\vec{F}_i = c_{inj} \cdot \vec{F}_i^{inj} + (1 - c_{inj}) \cdot \vec{F}_i^{wall}$. Доля c_{inj} определялась по соотношению площадей, приходящихся на отверстие и на стенку.

На рис. 13 приведены распределения числа Маха и десятичного логарифма скорости тепловыделения ϕ [Дж/(кг·м)] вдоль линий тока, полученные в расчете без учета ТСИ. Показано несколько поперечных сечений, продольная плоскость симметрии и некоторая горизонтальная плоскость.

Сразу за боковыми пylonами создаются благоприятные условия для протекания реакции за счет косого скачка уплотнения. Основное выделение тепла происходит в струйках тока, берущих начало от инжекторов предварительной подачи, в условиях сверхзвукового или околозвукового течения.

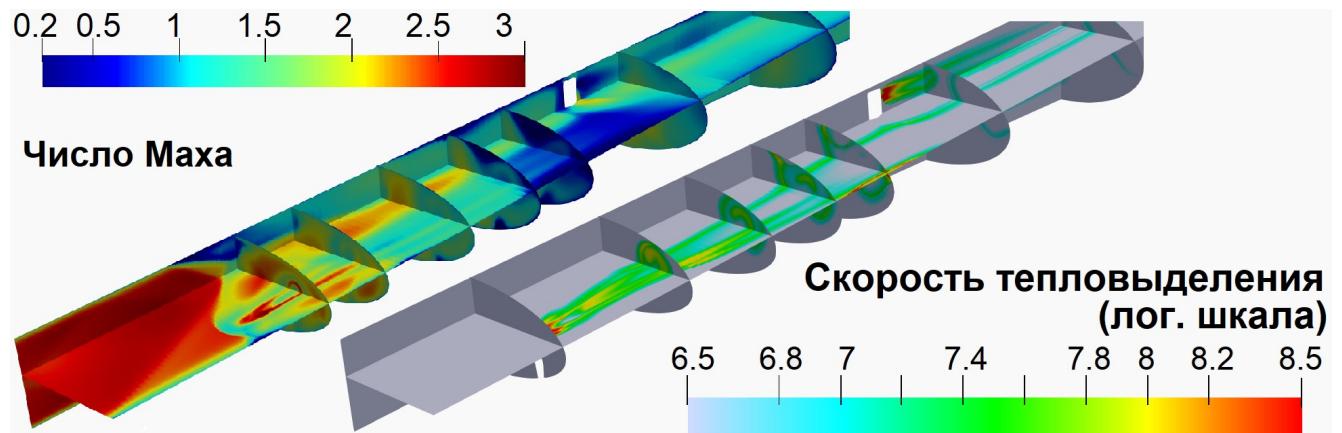


Рис. 13. Поля числа Маха и десятичного логарифма скорости тепловыделения ϕ [Дж/(кг·м)] вдоль линий тока в расчете модельной камеры без ТСИ

На рис. 14 приведены распределения статического давления на нижней стенке вдоль оси симметрии. Данные приведены как для расчета без инжекции топлива (пунктирные кривые), так и для расчета с горением (красные кривые).

Расчет без учета ТСИ имеет удовлетворительный с точки зрения инженерной практики уровень согласования с экспериментом, типичный для расчетов в такой постановке. Расчет позволяет выявить основные качественные особенности экспериментальных распределений давления. Расхождение расчета с данными эксперимента может быть объяснено рядом причин, среди которых – недостаточно подробная сетка и неполное воспроизведение условий эксперимента ввиду отсутствия подробных измерений.

Применение комбинированного метода на базе модели EPaSR (см. (4),(6)), как и в простых конфигурациях со сверхзвуковым горением, привело лишь к снижению интенсивности горения и не позволило улучшить результаты (синяя кривая на рис.14). Это связано с тем, что основное тепловыделение происходит в областях сверхзвукового либо трансзвукового течения. Таким образом, во всех рассмотренных задачах с преимущественно сверхзвуковым горением учет влияния TCI не играет определяющей роли.

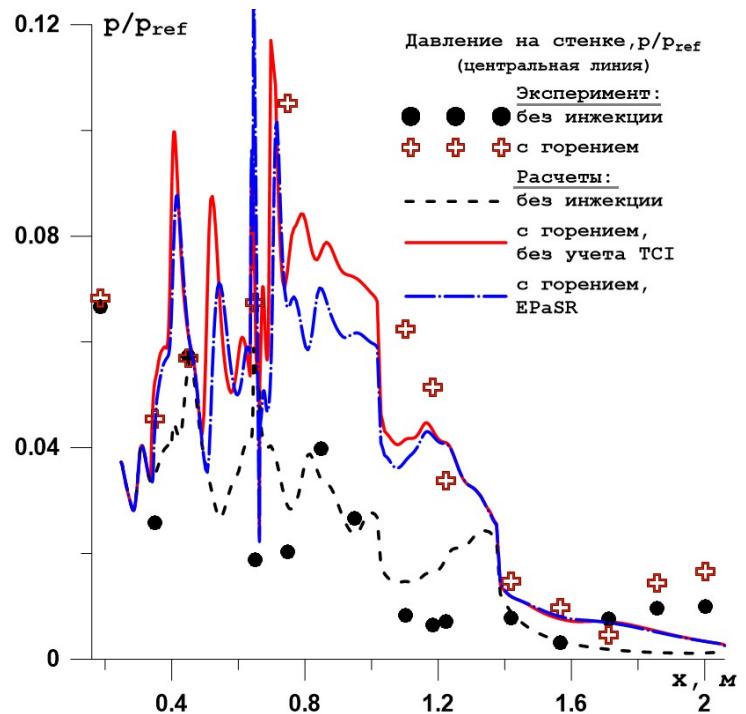


Рис. 14. Расчеты модельной камеры сгорания HEXAFLY-INT : распределения статического давления на нижней стенке вдоль оси симметрии

Выводы

В диссертационной работе 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 (TCI) на структуру пламени в областях преимущественно сверхзвукового течения.

Наиболее важные результаты, полученные в диссертации:

1. 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.

2. 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.
3. 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.
4. 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 (PaSR).
 - Примененные в диссертации расширенная (EPaSR) и обобщенная (GPaSR) модели реактора частичного перемешивания Сабельникова В.А. улучшили согласование с экспериментом в области существенного проявления взаимодействия турбулентности с горением по сравнению с квазиламинарным расчетом. Средняя ошибка определения скорости уменьшилась в 1.7 раз с моделью EPaSR и в 2.7 раз с моделью GPaSR, а температуры – в 2.3 раза с моделью EPaSR и в 3.2 раза с моделью GPaSR.
 - Модель GPaSR 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.

5. 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.

Публикации по теме диссертации

Публикации в 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. *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.
3. *Vlasenko V., Shiryaeva A.* Numerical simulation of non-stationary propagation of combustion along a duct with supersonic flow of a viscous gas //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 2013. Т. 227. №. 3. С. 480–492.
4. *Vlasenko V., Shiryaeva 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.

Публикации в прочих изданиях:

5. *Shiryaeva A.A.* Numerical simulation of turbulent diffusion combustion with the use of PDF method // XVII school-seminar of young scientists and specialists under the leadership of acad. Academy of Sciences A.I. Leont'ev "Gas dynamics and heat and mass exchange problems in aerospace technology" proceedings. Moscow. Publishing House MPEI. 2009. Vol.1. pp. 437–440.
6. *Ширяева А.А.* Новая программа для расчета 3D течений с горением // XXIV Научно-техническая конференция по аэродинамике ЦАГИ. 2013.
7. *Ширяева А.А.* Особенности численного метода и результаты тестирования программы ZEUS-S3pp для моделирования трехмерных течений с горением // Труды ЦАГИ. 2015. № 2735. С. 220–246.
8. *Shiryaeva A.A, Anisimov K., Vlasenko V.* Development and Application of Numerical Technology for simulation of different combustion types in high-speed viscous gas turbulent flow // 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 2014. AIAA Paper 2014-2097.

9. Ширяева А. Численный метод для моделирования разных режимов горения в высокоскоростных вязких турбулентных потоках: разработка и тестирование // Горение и взрыв. 2015. Т. 7. №7. С.144–149.
10. Shiryaeva A., Anisimov K., Vlasenko V. Numerical Method for Simulation of Different Combustion Types in High-Speed Viscous Turbulent Flows: Development & Application // Proc. Int. Conf. Space Propulsion. 2014.
11. Shiryaeva A. Technology and code for numerical simulation of different combustion types in high-speed viscous gas turbulent flows // Proc. Int. congress ICAS. 2014.
12. Ширяева А.А. Разработка и тестирование численного метода для моделирования разных режимов горения в высокоскоростных вязких турбулентных потоках // XXV научно-техническая конференция по аэродинамике ЦАГИ Пос.Володарского, ЦАГИ, 2014.
13. Shiryaeva A., Anisimov K. Development and application of numerical technology for simulation of different combustion types in high-speed viscous gas turbulent flows // Proceedings of 6th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS). 2015.
14. Shiryaeva A., Anisimov K. Numerical Technology for Simulation of High-Speed Viscous Gas Turbulent Flows with Different Combustion Regimes and its Application // 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. AIAA Paper 2015–3519.
15. Shiryaeva A., Sabelnikov V. "Critical Analysis of Classical Turbulent Combustion Experiments on the Basis of RANS Simulations" // AIP Conference Proceedings. 2018. Т. 2027. №. 1. С. 030078. Полный текст статьи доступен по адресу: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5065172>
16. Ширяева А.А. О влиянии переменных газодинамических свойств и состава газа на газодинамическую структуру струи // Труды ЦАГИ. 2013. №2710.
17. Vlasenko V.V., Shiryaeva A.A. Numerical simulation of non-stationary propagation of combustion along a duct with supersonic flow of a viscous gas // Proceedings of 4th European Conference for Aerospace Sciences, St.Petersburg. 2011.
18. Vlasenko V.V., Shiryaeva A.A. Application of the fast calculation technologies to simulation of non-stationary supersonic viscous flow with combustion // Proceedings of 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2012
19. Власенко В.В., Ширяева А.А. Расчеты течения в модельной высокоскоростной камере сгорания с использованием различных моделей химической кинетики // Горение и взрыв. 2015. Т.8. №1. С.116–125.
20. Фролов С.М., Зангиев А.Э., Семенов И.В., Власенко В.В., Волощенко О.В., Николаев А.А., Ширяева А.А. Моделирование течения в высокоскоростной камере сгорания в трехмерной и двумерной постановке // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. №1. С.126–135.