

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертационной работе Ширяевой Анны Александровны
“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”

Диссертация А.А.Ширяевой “Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса” выполнена в отделе вычислительной аэродинамики Отделения аэродинамики силовых установок Федерального государственного унитарного предприятия “Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.Жуковского” (ФГУП “ЦАГИ”).

Диссертация посвящена одной из самых сложных проблем механики жидкости и газа – моделированию турбулентного горения. Описание турбулентных течений без горения достигло в настоящее время значительных успехов. Разработаны многие модели турбулентности, позволяющие описывать различные классы течений в рамках уравнений Рейнольдса. Большие успехи достигнуты в прямом численном моделировании крупномасштабной турбулентности (LES – Large Eddy Simulation). Но проблема турбулентного горения все еще далека от удовлетворительного решения, несмотря на полувековую историю исследований в этой области. Во многом это связано со спецификой проблемы, где основную роль играют не процессы турбулентной диффузии, разыгрывающиеся в основном на уровне крупных турбулентных вихрей, а процессы молекулярного смешения, протекающие на уровне мельчайших турбулентных структур, близких к масштабу Колмогорова. Это требует разработки принципиально иных подходов к приближенному описанию явления. Кардинального решения проблемы нет до сих пор, что и определяет актуальность темы исследования.

В ЦАГИ имеется научная школа в области высокоскоростных камер сгорания, основанная выдающимся ученым, изобретателем ГПВРД Е.С.Щетинковым. В рамках этой школы проводились совместные теоретические, экспериментальные и расчетные исследования турбулентного горения. К сожалению, теоретические и расчетные исследования в значительной степени сократились после ухода из ЦАГИ в 90-х гг. XX в. двух выдающихся теоретиков – В.А.Сабельникова и В.Л.Зимонта. Научный руководитель данной диссертации, будучи учеником В.А.Сабельникова, сконцентрировал свои усилия на разработке численных технологий моделирования течений в высокоскоростных камерах сгорания. Он был также в курсе последних работ В.А.Сабельникова в области турбулентного горения. Однако было очевидно, что восстановление исследований в данной области требует полного погружения в эту весьма специфическую тематику. Эта работа была поручена А.А.Ширяевой, и она прекрасно справилась с

поставленной (исключительно трудной) задачей. Ей потребовалось около 10 лет, чтобы глубоко освоить данное научное направление. Она воспользовалась опытом моделирования течений газа, накопленным в отделе вычислительной аэродинамики отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ. Помощь в теории была оказана В.А.Сабельниковым, связь с которым не прерывалась. В 2017 г. В.А.Сабельников возглавил лабораторию в ЦАГИ и в значительной степени содействовал своими консультациями завершению исследований, описанных в данной диссертации. Несмотря на совершенно необходимые в таких сложных исследованиях советы научного руководителя и специалиста-теоретика в данной области проф. В.А.Сабельникова, основные результаты диссертации получены А.А.Ширяевой самостоятельно.

Перед А.А.Ширяевой были поставлены две цели: 1) разработать и реализовать на практике метод моделирования высокоскоростных течений газа со смешанными режимами турбулентного горения; 2) с использованием этого метода исследовать вопрос о значении взаимодействия турбулентности с горением в течениях с преимущественно сверхзвуковым горением. Последний вопрос имеет принципиальное значение для описания сверхзвукового горения. Однозначного ответа на этот вопрос пока нет, и мнения разных исследователей расходятся. Обе цели были диссертантом успешно достигнуты, что и описано в настоящей диссертационной работе.

Введение в диссертацию содержит, в том числе, обзор экспериментальных и расчетных работ по рассматриваемому вопросу.

В Главе 1 описаны модели и методы для описания турбулентного горения. Основное внимание уделено двум существенно различным классам моделей взаимодействия турбулентности с горением (TCI - Turbulence-Combustion Interaction) – моделям микроламинарных пламен (flamelets) и моделям частично перемешанного реактора (PaSR – Partially Stirred Reactor). Новым в этой Главе является комбинированный метод для расчета смешанных режимов турбулентного горения, т.е. течений, в которых происходит переход от одного механизма стабилизации горения к другому. Именно такие смешанные режимы характерны для реальных камер сгорания. Следует отметить предложенную автором интерпретацию модели PaSR, которая позволила дать ясное физическое обоснование уравнениям модели и выбрать устойчивый численный алгоритм интегрирования этой крайне жесткой системы уравнений. В последнем разделе автор дает блестящий физико-математический анализ проблемы нефизичного “динамического равновесия”, которое было впервые обнаружено А.А.Ширяевой в расчетах. Автор предлагает способ решения этой проблемы и дает строгое доказательство единственности физичного решения при использовании этого способа.

Глава 2 посвящена применению выбранных классов моделей TCI к описанию классических экспериментов по сверхзвуковому турбулентному горению. Рассмотрены три классических эксперимента, которые отличаются предельно простой геометрией и в которых промерялись многие значимые параметры (температура, состав газа и пр.). Эти эксперименты до сих пор

широко используются для валидации моделей. В диссертации А.А.Ширяевой впервые сопоставлены результаты моделирования этих экспериментов без учета TCI и на основе моделей flamelet и PaSR. Оказалось, что обе модели (основанные на существенно разных физических представлениях о турбулентном горении) не позволяют дать существенного приближения расчета к эксперименту. С другой стороны, показано, что учет различных газодинамических факторов (геометрии подводящих каналов, теплообмена на стенках, вытесняющего действия пограничных слоев на стенках канала) может дать больший эффект, чем применение моделей TCI. Применение комбинированного метода, основанного на модели flamelet, показало многочисленные недостатки этой модели, которые становятся существенными при описании смешанных режимов горения. Поэтому далее рассматривается только модель PaSR. Автором установлен механизм стабилизации горения в эксперименте Ченга и др., и становится ясно, что турбулентность в основном подготавливает смесь, но высокоскоростной поток уносит смесь из области турбулентного перемешивания, поэтому реакция определяется не пульсациями, а локальными параметрами среднего течения и его газодинамической структурой.

В Главе 3 рассматривается эксперимент ONERA по дозвуковому горению за ступенькой. Выбор этого эксперимента продиктован необходимостью продемонстрировать работоспособность использованной в Главе 2 модели PaSR. Дано сопоставление разных моделей этого класса, включая модель GPaSR, которая применена на практике впервые. В диссертации установлен смешанный механизм стабилизации горения в этом эксперименте. В области волнового механизма распространения горения за счет диффузии тепла влияние TCI существенно, и модели EPaSR и GPaSR дают существенное приближение расчета к эксперименту.

Наконец, в Главе 4 разработанные методы и программы применены к описанию трехмерного течения в реальной высокоскоростной камере сгорания. Удовлетворительное с инженерной точки зрения качество согласия с экспериментом достигнуто в расчете без учета TCI. Учет TCI не позволил приблизиться к эксперименту. Дан физический анализ течения, который показывает, что горение происходит в основном в области сверхзвукового течения. Таким образом, во всех рассмотренных задачах с преимущественно сверхзвуковым горением вклад от применения моделей TCI оказался меньшим, чем вклад от газодинамических особенностей течения.

Можно резюмировать, что в диссертации решена задача, имеющая важное значение для науки и практики – создан метод моделирования течений с турбулентным горением в высокоскоростных потоках, и с помощью этого метода исследован вопрос о влиянии TCI в областях преимущественно сверхзвукового горения. Выполнена колоссальная работа, потребовавшая от автора огромной самоотдачи и тщательного, детального анализа получаемых результатов. И хотя в выбранном классе течений (с преимущественно сверхзвуковым горением) роль TCI оказалась второстепенной, представленные результаты показывают, что созданные методы могут быть

применены к решению гораздо более широкого круга задач, в которых эффекты ТСИ могут проявляться более сильно. Накопленный автором опыт и глубокое понимание физики турбулентного горения должно стать основой для дальнейших исследований в направлении создания более совершенных моделей ТСИ.

Диссертация А.А.Ширяевой соответствует паспорту специальности 01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”, поскольку в ней исследуются математические модели течений газа с турбулентным горением; поскольку с использованием этих моделей выполнена интерпретация экспериментальных данных; наконец, поскольку на основе анализа результатов численного моделирования установлены физические механизмы стабилизации горения в двух классических экспериментах по турбулентному горению и исследована роль взаимодействия турбулентности с горением в преимущественно сверхзвуковых течениях.

Результаты диссертации докладывались на многочисленных международных и отраслевых конференциях, опубликованы с необходимой полнотой в 20 печатных работах, включая 4 статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК. До представления диссертации к защите основные положения диссертации были обсуждены на Видеосеминаре ЦАГИ - ИТПМ СО РАН - СПбПУ – НИИ механики МГУ и на Семинаре ВЦ РАН.

По мнению научного руководителя, диссертация Ширяевой Анны Александровны - цельное и законченное исследование, убедительно демонстрирующее квалификацию автора. Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Научный руководитель,
зам. нач. лаборатории №14
отделения аэродинамики силовых установок ЦАГИ
д.ф.-м.н., доцент

В.В.Власенко

Подпись Власенко В.В. заверяю.
Ученый секретарь Диссертационного совета ЦАГИ
д.ф.-м.н., доцент



М.А. Брутян