

УТВЕРЖДАЮ
Директор
Института теоретической
и прикладной механики
им. С.А. Христиановича
Член-корреспондент РАН



В диссертационный совет Д002.073.03

ОТЗЫВ ведущей организации

На диссертационную работу **Ширяевой Анны Александровны**
«Моделирования высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного
горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа А.А. Ширяевой «Моделирования высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса» посвящена численному исследованию и анализу особенностей турбулентных реагирующих течений в элементах прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД).

Большинство рассматриваемых в диссертации течений решается с использованием новых физических моделей описывающих воздействие турбулентности на процессы горения в высокоскоростном потоке. Для их решения автор разрабатывает линейку вычислительных подходов, основанных на сочетании глубокого понимания физических процессов турбулентного горения и традиционных подходов, использующих осредненные параметры течения. Пользуясь таким приемом, ей удастся построить весьма экономичный и эффективный вычислительный аппарат, позволивший провести подробные исследования целого ряда конкретных задач.

Автор рассмотрела влияние турбулентности на скорости течения химических реакций. Модифицировала численные методы решения математической модели. Разработала эффективный программный комплекс решения предложенной математической модели. Провела тестирование программного комплекса на известных результатах модельных физических экспериментов. Выполнила расчеты широкого спектра параметров ряда турбулентных химически реагирующих высокоскоростных

течений. Провела сопоставление результатов с адекватными экспериментальными и расчетными данными зарубежных и отечественных авторов.

Работа относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ: «Транспортные и космические системы» и «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Несомненная **актуальность** выполненного А.А. Ширяевой исследования обусловлена как большим фундаментальным значением в механике сплошных сред задач исследования структуры и физической природы сложных турбулентных течений с горением, так и большим прикладным значением расчетов таких потоков, измерения которых затруднены.

В связи с этим тема диссертационной работы Ширяевой А.А., посвященной применению методов математического моделирования и созданию пакетов прикладных программ для исследования турбулентного горения, является, безусловно, актуальной, представляет **теоретический** интерес и имеет **практическую** ценность.

Научная новизна результатов исследования Ширяевой Анны Александровны заключается в том, что она впервые провела численное моделирование процессов турбулентного горения, используя почти весь набор имеющихся физических моделей. **Практическая** ценность работы определяется в первую очередь тем, что полученные результаты способствуют более глубокому пониманию особенностей турбулентного горения в высокоскоростных камерах сгорания, что полезно для развития методов управления процессами при решении конструкторских и инженерных задач при создании высокоскоростной техники.

Достоверность полученных результатов определяется тестовыми расчетами, решение которых сопоставлялось с имеющимися экспериментальными данными, а также с расчетами других авторов.

Апробация работы представляется вполне приемлемой. Результаты исследований опубликованы в 20 работах, из них 4 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть представлены основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Основные результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных научных конференциях и семинарах, которые перечислены в автореферате.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 207 наименований и 2 приложений, в работе содержится 105 иллюстраций. Общий объем работы 217 страниц.

Кратко проанализируем представленный в работе материал.

Во **введении** сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту. Описана структура и дано краткое описание диссертационной работы.

В **первой главе** представлен обстоятельный обзор современного состояния вопроса по теме диссертационной работы. При описании турбулентного горения, как правило, решается система уравнений Навье-Стокса, осредненная по времени (RANS) или по пространству (LES) и дополненная дифференциальными уравнениями для всех компонент реагирующей смеси. В этой главе рассматриваются физико-математические модели и численный метод, применяемые для описания трехмерных течений с турбулентным горением. Представлена полная система уравнений Рейнольдса для нестационарных трехмерных течений многокомпонентного вязкого газа с неравновесными химическими реакциями. Кратко описан численный метод решения этой системы. Дано описание используемых в работе моделей турбулентности ($q-\omega$ и SST). Рассмотрена постановка граничных условий. Выписаны формулы для описания вклада от химических реакций, а также используемые аппроксимации термодинамических функций. Представлено общее описание проблемы учета взаимодействия турбулентности с горением (TCI) и дан краткий обзор основных подходов к ее решению. Далее подробно изложена модель микроламинарных пламен (flamelets). Выводятся уравнения, описывающие распределение параметров в микроламинарном пламени. Для получения средних параметров течения используется функция плотности вероятности (ФПВ) бета-распределения, для определения параметров которой решаются два дополнительных уравнения в частных производных. Анализируется область определения ФПВ. Для устранения проблем, возникающих при приближении к границам турбулентной области, учитываются эффекты перемежаемости.

Подробно рассмотрен класс моделей учета TCI – модели реактора частичного перемешивания (PaSR). Представлено несколько моделей этого класса, одна из которых (GPaSR) рассматривается впервые. Предложена локальная модельная задача о системе из двух взаимодействующих реакторов, которая позволяет дать физически обоснованный вывод уравнений моделей PaSR, выбрать устойчивый численный алгоритм для их программной реализации, исследовать зависимость модели от ее параметров.

Глава 2 посвящена тестовым расчетам и моделированию турбулентных сверхзвуковых струй с горением. Вначале кратко описаны программы **ZEUS-S3pp** и **zFlare**, которые используются в расчетах. Перечислены тестовые расчеты без применения моделей TCI, которые были использованы автором для проверки этих программ. В качестве примера подробно рассмотрено моделирование эксперимента A.D. Cutler. Далее

рассмотрено моделирование классических экспериментов по сверхзвуковому турбулентному горению – экспериментам с соосными струями водорода и воздуха (J.S. Evans et al., 1978; T.Cheng et al., 1994) и эксперименту с пристенной струей водорода (M.C. Burrows & A.P. Kurkov, 1971).

Во всех экспериментах и расчетах со сверхзвуковым горением, рассмотренных в Главе 2, не было обнаружено существенного вклада от моделей учета TCI. Эту главу отличает тщательная методичная проработка всех особенностей используемых физических моделей.

В главе 3 с использованием различных моделей класса PaSR рассматривается эксперимент с горением метана в дозвуковом потоке – камера сгорания с обратной ступенькой, экспериментальные исследования которой проводились в ONERA (P.Magre, et al., 1988). Описана валидация разработанных программ без применения моделей учета TCI. Выполнен стандартный набор тестов для проверки работоспособности солвера, разработанный в ЦАГИ. Дано описание экспериментальных измерений и организации расчетов. Затем к описанию экспериментов применяются локальные модели класса PaSR (базовая модель и UPaSR). Наконец, то же течение моделируется с помощью нелокальных моделей класса PaSR (EPaSR и GPaSR). Дается физический анализ полученных результатов, и на его основе объясняется смешанный механизм стабилизации горения, который реализуется в этом эксперименте.

В четвертой главе описаны результаты применения разработанного кода для расчета трехмерных течений в камере сгорания высокоскоростного ПВРД на водородном топливе для гипотетического сверхзвуковой гражданского ЛА, который испытывался на АДТ Т-131 в ЦАГИ в рамках европейского проекта HEXAFLY-INT.

В Приложении 1 описана попытка получить в расчете равновесное состояние реагирующей смеси идеальных газов, используя численные методы, аналогичные тем, что применяются при моделировании течений реагирующего газа.

В заключение диссертационной работы сформулированы основные выводы и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Степень обоснованности и достоверности научных положений выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обеспечиваются корректностью математических моделей, использованием проверенных численных методов, сравнением результатов расчетов с известными экспериментальными данными.

Основные результаты, полученные диссертантом, опубликованы в доступной печати, автореферат полностью отражает содержание диссертации. По каждой главе и

работе в целом имеются выводы. Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате.

Замечания к диссертационной работе

1. В первой главе диссертации не приводится полная математическая модель рассматриваемого явления (не выписаны соответствующие уравнения переноса). Автор ограничивается только кратким описанием рассматриваемых уравнений, что не позволяет в полной мере судить о полноте и замкнутости математической модели. Кроме того, отсутствует информация о коэффициентах переноса.
2. Неясно, как при численном моделировании проводилось воспламенение топлива в потоке.
3. При решении нестационарных задач и рассмотрении проблем связанных с горением в потоке часто возникают слоистые течения (сверхзвуковой и дозвуковой слой) на выходе из канала. Это приводит к необходимости постановки смешанных краевых условий. Однако в диссертации эти вопросы не обсуждаются. Хотя в расчетах такие ситуации несомненно встречались.
4. В работе нет сравнения с моделями LES и DNS. По этим моделям также в некоторых примерах зарубежных авторов наблюдается хорошее совпадение с экспериментом.
5. Требуется обосновать применения мягких граничных условий для расчета распространения компонент на границах расчетной области. Более корректной постановкой является использование этих условий на выходных границах; на входной границе необходимо ставить условия первого рода, определяющие концентрацию компонент в потоке воздуха.
6. В работе все расчеты высокотемпературных течений газа в камере сгорания проведены без учета потерь тепла в стенки канала. Не учет этого явления может существенно изменить конечный результат.
7. Из текста диссертации неясно какая система координат используется. Как при использовании уравнений в криволинейной системе координат аппроксимируются метрические коэффициенты и как точность их аппроксимации влияет на точность численного решения в целом.
8. Текст диссертации содержит целый ряд опечаток и неточностей в тексте. Так, например, в работе термин «предЫнжектор» используется множество раз.

Общий вывод.

Диссертация Ширяевой Анны Александровны является оригинальной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены новые научные и практически значимые результаты исследований по турбулентному горению в высокоскоростных потоках, имеющие существенное значение для механики жидкости, газа и плазмы в части, касающейся фундаментальных проблем разработки методов управления процессами горения.

Несмотря на сделанные замечания, представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием, представляющим значительный вклад в раздел аэромеханики, связанный с моделированием процессов турбулентного горения в дозвуковых и сверхзвуковых нестационарных потоках. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Ширяева А.А. достойна присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Ширяевой А.А. была заслушана на видеосеминаре ИТПМ, ЦАГИ, институт Механики МГУ 18 сентября 2018 года и получила положительную оценку. Отзыв на диссертацию обсужден на семинаре лаборатории физики быстропротекающих процессов 19 декабря 2018 г. протокол № 18

ведущий научный сотрудник
лаборатории физики быстропротекающих процессов
Федерального государственного учреждения науки
Института теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
(630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1,
<http://www.itam.nsc.ru>, e-mail: admin@itam.nsc.ru,
тел.: 8(383) 330-24-64, факс (383)330-7268),
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы)

Зудов



Зудов Владимир Николаевич

e-mail: zudov@itam.nsc.ru

т. 8(383) 330-39-23

20 ноября 2018 г.

Подпись Зудова В.Н. заверяю

Ученый секретарь ИТПМ СО РАН

Ю.В.Кратова

Ю.В.Кратова