

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Ширяевой Анны Александровны

на тему: "Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений

Рейнольдса"

по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Актуальность избранной темы

В настоящее время наиболее перспективной технологией для существенного сокращения времени полетов гражданской авиации на дальние расстояния является высокоскоростной прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД). При больших сверхзвуковых скоростях полета, начиная от чисел Маха порядка 5, турбовентиляторные двигатели должны быть заменены более передовыми двигательными установками, такими как ПВРД.

В процессе проектирования высокоскоростных транспортных средств важное значение имеет широкое применение инструментов численного моделирования. Требуется применения специальных математических кодов для того, чтобы в полной мере отразить всю полноту сложных физических и химических процессов, происходящих в тракте высокоскоростного ПВРД.

Течение газа в высокоскоростном ПВРД имеет сложную волновую структуру с огромными перепадами газодинамических параметров (давления, температуры и т.п.). Важную роль играют процессы турбулентного смешения и неравновесной химической кинетики горения топлив. Основной особенностью высокоскоростного ПВРД является то, что

горение осуществляется при сверхзвуковых скоростях. В камере сгорания должно происходить воспламенение горючего вследствие его смешения с воздухом, нагретым и сжатым во входном устройстве.

Важнейшим фактором, влияющим на эти процессы, является взаимодействие турбулентности и горения (Turbulence-Combustion Interaction, TCI).

С этой точки зрения, совершенствование физических моделей и разработка новой математической модели турбулентного горения представляет актуальную задачу современной науки.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждается использованием основных законов механики жидкости и газа; тестированием разработанной модели на различных типах течения; сравнением результатов расчётов с экспериментальными данными. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на многочисленных конференциях и научных семинарах.

Научная новизна и практическая значимость полученных результатов для дальнейшего развития науки. В диссертации А.А.Ширяевой представлены результаты, обладающие научной новизной, имеющие практическую значимость:

- Впервые разработан и внедрен комбинированный метод расчета смешанных режимов горения. В этом случае модели взаимодействия турбулентности с горением используются только для оценки химических источниковых членов в уравнениях движения газа.

- В программе реализован новый метод учета взаимодействия турбулентности с горением (обобщенная модель реактора частичного

смещения - Generalized PaSR), который применяется для решения тестовых и практических задач.

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

- Исходное граничное условие было сформулировано и реализовано для имитации инъекции из отверстия при использовании сетки, которая не соответствует его форме.

- Было обнаружено и объяснено нефизическое «динамическое» равновесие, которое возникает при расчете реагирующих потоков с использованием многоступенчатых кинетических схем.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные физические модели и численные методы реализованы в программных модулях и могут быть использованы для численного моделирования камер сгорания, для оценки интегральных характеристик воздушно-реактивных двигателей, а также для предварительного проектирования авиационных силовых установок и сопровождения их испытаний.

Краткая характеристика основного содержания диссертации.

Диссертация А.А.Ширяевой состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования; формулируется цель и основные задачи работы; описывается предлагаемый автором подход к решению поставленных задач; характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация. Кроме того, дается краткое изложение содержания диссертации.

В **первой главе** автор рассматривает математические модели и методы для описания турбулентного горения. Подробно описаны различные модели TCI,

в частности, модель микроламинарных пламен (flamelet) и модель реактора частичного перемешивания (PaSR).

В главе 2 проведены тестовые расчеты турбулентных химически реагирующих струй. Проведено сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными данными: A.D. Cutler et al., J.S. Evans et al., M. Burrows, A. Kurkov.

Глава 3, в основном, посвящена математическому моделированию эксперимента с горением метана в дозвуковом потоке - камеры сгорания с обратной ступенькой, экспериментальные исследования которой проводились в ONERA [139]. Используются различные модели учета влияния турбулентности на горение.

И наконец, в Главе 4 разработанные методы и программы применяются к моделированию экспериментальных исследований высокоскоростной камеры сгорания на водородном топливе для гипотетического сверхзвукового гражданского самолета.

В целом диссертация А.А.Ширяевой является законченным исследованием, представляет решение актуальных проблем, объединенных общим подходом, обеспечивающим возможность решения задач расчета сверхзвукового турбулентного горения. К несомненным достоинствам работы следует отнести глубокий анализ существующих методов расчета TCI, создание и программную реализацию собственного численного метода для 3D задач, в котором используются достаточно новые и оригинальные решения.

Замечания, возникшие в процессе изучения предоставленных материалов

1. Несколько неточно звучит фраза о "взаимодействии турбулентности с горением" в основных задачах диссертации. Из нее следует, что исследуется и анализируется взаимное влияние турбулентности и горения, хотя на самом деле решается только задача о влиянии турбулентности на скорости химических реакций. Вопрос воздействия горения на генерацию или диссипацию турбулентности не рассматривается.

2. В работе рассматриваются, в основном, две модели учета влияния турбулентности на горение: модель микроламинарных пламен (flamelet) и расширенная модель реактора частичного перемешивания (EPaSR). Нетрудно заметить, что при использовании обеих моделей осредненные скорости химических реакций могут быть только *меньше* (или равны) скоростям реакций, рассчитанным по средним параметрам течения. Это связано с тем, что эти модели используют параметры смешения горючего и окислителя в качестве основной характеристики, влияющей на горение. Такой подход, вероятно, справедлив для низкоскоростных течений. В сверхзвуковых течениях, когда существенно возрастает вклад кинетической энергии в полную энергию, пульсации температуры зависят не только от переменной смешения, но и от пульсаций скорости. Это может привести к общему увеличению скоростей реакций за счет нелинейной зависимости коэффициентов скоростей реакций от температуры. Указанный эффект особенно важен для реакций с высокой энергией активации, и когда число Дамкёлера не сильно отличается от единицы.

3. В тексте диссертации наблюдается некоторая путаница со ссылками на рисунки, источники литературы и на главы. Например, на стр.20 есть ссылка на рис.1, хотя имеется в виду рисунок 2. Подобные опечатки - на страницах 54, 55, 56, 61. На стр.43 при вводе формулы для поправки на сжимаемость указывается в качестве источника книга Лойцянского Л.Г. "Механика жидкости и газа" [27], в которой ничего подобного не было и быть не могло. На стр. 140 в начале главы 3 имеется ссылка на результаты,

полученные в главе 3 (видимо, имелось в виду "в главе 2") и т.п. Все это несколько затрудняет чтение диссертации.

4. В расчетах для описания горения водорода в воздухе использовалась кинетическая схема Моретти [151] 1965-го года (8 реакций). Думается, что для получения адекватной картины воспламенения водорода в сверхзвуковом потоке воздуха следует учитывать более современные кинетические схемы с участием H_2O_2 и HO_2 . Это вряд ли существенно усложнило бы решение системы, т.к. автор предложил и реализовал эффективные численные методы решения жестких уравнений химической кинетики.

5. В обзоре используются скопированные рисунки невысокого качества (в некоторых случаях трудно разобрать различные методы) и с пояснениями на английском языке.

Отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования, они не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации, описанные выше. Результаты довольно оригинальны, обладают научной новизной и практически значимы, демонстрируют вклад автора в разработку физических моделей турбулентного горения в высокоскоростных камерах сгорания. Это характеризует соискателя как вполне сложившегося исследователя, умеющего самостоятельно ставить и решать сложные физико-математические задачи.

Заключение.

Работа базируется на достаточном числе исходных данных и примеров. Диссертация написана доходчиво и грамотно. В заключении и главах работы сделаны четкие выводы. Выводы и рекомендации обоснованы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ширяева Анна Александровна заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Официальный оппонент, профессор кафедры

«Авиационно-космической теплотехники» МАИ,

д.т.н, доцент



А.М.Молчанов

Адрес электронной почты: alexmol_2010@mail.ru , тел: +7(499)1584314.

Подпись Молчанова А.М. удостоверяю

И.о. начальника отдела

Учёного и диссертационных советов



Т.А.Аникина

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Почтовый адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993.

29.12.2018