

В диссертационный совет 24.1.224.02,
созданный на базе Федерального
государственного учреждения
“Федеральный исследовательский центр
“Информатика и управление” Российской
академии наук”

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Вэньчао Лю «Влияние модели химической кинетики на результаты численного моделирования турбулентных течений с горением», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы

В диссертационной работе Вэньчао Лю поставлена и решена задача, имеющая важное значение для развития численного моделирования турбулентных течений при наличии горения в различных энергетических устройствах – задача о влиянии химической кинетической схемы на результаты расчета двух важных классов турбулентных течений в каналах. Сформулированы **научно обоснованные разработки** – установлены требования к кинетической схеме при использовании модели турбулентного горения из класса моделей реактора частичного перемешивания (PaSR) и произведена калибровка эмпирической константы в этой модели.

Актуальность темы исследования. Горение в различных энергетических устройствах (двигателях внутреннего сгорания, газотурбинных установках, авиационных двигателях и др.) представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий взаимодействие тепло-массопереноса за счет химических реакций с параметрами турбулентного течения. Детальное описание процессов воспламенения, смешения и горения в камере сгорания с помощью численного моделирования имеет большое практическое значение. Расчетные исследования, проводимые с использованием таких методик, позволяют существенно сократить затраты на дорогостоящие и сложные экспериментальные исследования течения и горения в камерах сгорания ЛА и ГТУ. В связи с большими вычислительными затратами при расчете трехмерных турбулентных течений с горением приходится использовать упрощенные модели химической кинетики, а также подбирать модели турбулентного горения, сохраняя при этом точность

описания основных физико-химических процессов. Поэтому исследование взаимодействия модели химической кинетики с другими математическими моделями (моделью турбулентности, моделью турбулентного горения) актуально для правильного воспроизведения физических процессов турбулентного горения при проектировании и доводке камер сгорания ЛА и ГТУ.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Текст диссертации включает в себя 154 страниц (основной текст – 147 страниц и 2 приложений на 7 страницах), 80 иллюстрацию, 14 таблиц и ссылок на 161 источник литературы.

Во Введении сначала рассмотрены основные типы моделей химической кинетики (на примере моделей горения водорода и различных углеводородных топлив в воздухе). Дан обзор предыдущих работ по теме диссертации. Рассмотрены исследования, где показано влияние кинетики на результаты моделирования различных экспериментов с горением водорода и углеводородных топлив в воздухе.

В **Главе 1** описаны физико–математические модели и численные методы, применяемые далее для описания турбулентных течений реагирующего газа. Представлена система уравнений Рейнольдса для течений реагирующего газа и её замыкающие соотношения, которые включают модели турбулентности (SST $k-\omega$ и BSL $k-\omega$) и модели турбулентного горения из класса моделей реактора частичного перемешивания (PaSR). Также представлены методы вычисления источниковых членов в уравнениях компонентов смеси и постановка граничных условий на стенках с шероховатостью.

В **Главе 2** решена задача о распространении ламинарного пламени в предварительно перемешанной смеси и исследованы кинетические механизмы, которые используются далее для решения основных задач диссертации. Оказалось, что использование коэффициентов диффузии воздуха вместо коэффициентов многокомпонентной бинарной диффузии может привести к завышению скорости ламинарного пламени метана в воздухе до 8.69%, и к занижению скорости распространения ламинарного пламени водорода в воздухе до 70%. Рассмотренные в главе глобальные кинетические модели BFER2 и Фролов4 рассчитаны на описание волнового диффузионного механизма горения и могут дать существенные ошибки при описании локального самовоспламенения в реакторе постоянного давления.

В **Главе 3** в рамках трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS) выполнено численное моделирование классического эксперимента ONERA по высокоскоростному турбулентному предварительно не перемешанному горению водорода в расширяющемся канале, выполненного в рамках международного проекта LAPCAT II.

В расчетном исследовании решались стационарные осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) для реагирующего газа с шероховатыми стенками, которые замыкались моделью SST $k-\omega$ и различными химическими кинетическими моделями горения водорода в воздухе. Взаимодействие турбулентности с горением не учитывалось, поскольку горение протекает в преимущественно сверхзвуковом режиме. Расчеты, описанные в разделе 3.2 (Течение в подогревателе (с соплом Лавалю) и в гладком канале), были выполнены в Лаборатории JetSim ЦАГИ при помощи программы zFlare. Автор готовил блок расчета химической кинетики для этих расчетов и принимал участие в анализе полученных результатов. Остальные расчеты этой главы выполнены автором при помощи коммерческого пакета вычислительной гидродинамики ANSYS FLUENT. Расчеты сопоставляются с экспериментальными данными и данными расчетов других авторов. В основном проанализированы факторы, определяющие структуру течения в экспериментальной модели с шероховатой стенкой. Результаты показывают, что при моделировании высокоскоростного горения в канале с существенной ролью самовоспламенения, модель химической кинетики мало влияет на распределение давления по стенкам канала, но оказывает значительное влияние на трехмерную структуру течения. Это приводит к различиям в предсказании распределения и величины тепловых потоков, а также полноты сгорания топлива.

В Главе 4 в рамках нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS) выполнено численное моделирование классического эксперимента ONERA по дозвуковому турбулентному предварительно перемешанному горению метана в канале с обратным уступом. Дано подробное описание этого эксперимента и использованных в них средств измерений. Показано, что в этой задаче при переходе от SST $k-\omega$ к другой модели турбулентности BSL $k-\omega$ необходима настройка коэффициентов модели турбулентного горения PaSR. Выполнена настройка PaSR для работы с моделью BSL $k-\omega$. Достигнуто качество моделирования турбулентного предварительно перемешанного горения смеси метана и воздуха, стабилизированного в канале по волновому диффузионному механизму, сопоставимое с наилучшими из результатов, полученных в ЦАГИ с использованием модели EPaSR. Также показано, что модель PaSR более точно описывает рассматриваемый режим горения при использовании глобальных, а не многостадийных кинетических механизмов. Модель PaSR, в уравнениях которой отсутствует учет истории состояний тонких структур, при использовании детального кинетического механизма дает неверный путь реакции (с другим интегралом тепловыделения).

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Впервые исследовано влияние химической кинетической модели горения предварительно не перемешанного водорода в воздухе на распределение статического давления и тепловых

потоков по стенкам канала, а также на полноту сгорания в экспериментальной модели ONERA LARCAT II.

2. При исследовании дозвукового турбулентного течения с горением смеси метана с воздухом в канале с обратным уступом (ONERA) впервые дано объяснение причин, по которым модифицированная модель турбулентного горения PaSR дает более точные результаты при использовании глобальных, а не многостадийных кинетических механизмов.

3. Впервые исследовано влияния молекулярной диффузии на структуру высокоскоростного течения с предварительно не перемешанным горением в расширяющемся канале с шероховатыми стенками.

Теоретическая значимость заключается в том, что для двух классов задач турбулентного горения в каналах (высокоскоростное неперемешанное горение в канале с существенной ролью самовоспламенения и низкоскоростное перемешанное горение, стабилизированное по волновому диффузионному механизму) выявлены механизмы взаимодействия химической кинетики с другими физическими процессами, которые оказывают существенное влияние на структуру течения. Даны рекомендации по выбору модели химической кинетики при использовании модели турбулентного горения PaSR.

Практическая значимость работы заключается в том, что подробно описан опыт настройки расчета и реализация рассмотренных математических моделей при их использовании в коммерческом пакете программ вычислительной гидродинамики ANSYS FLUENT.

Личный вклад автора. Разработка и использование программы для моделирования распространения одномерного ламинарного пламени; построение геометрий и расчетных сеток; настройка расчетов и модификация моделей течения при наличии горения в пакете ANSYS FLUENT; проведение расчетов с использованием собственной программы и пакета ANSYS FLUENT; проведение всех расчетов и физический анализ их результатов во всех рассматриваемых задачах.

Достоверность результатов обосновывается сопоставлением полученных численных результатов с опубликованными в научной литературе детальными экспериментальными данными и расчетами других авторов, а также сопоставлением результатов расчетов на разных сетках и расчетов с использованием различных моделей турбулентности, химической кинетики и турбулентного горения. Наибольшее внимание уделено согласованию с экспериментальными данными результатов расчетов по нескольким, отражающим влияние разных физических факторов, параметрам течения.

По результатам рассмотрения диссертации Вэньчао Лю можно сделать следующие замечания:

1. В Главе 1 при описании математической постановки рассматриваемых задач (Главы 3 и 4) не указано, что все параметры течения и горения (за исключением давления и плотности) записаны с использованием осреднения по Фавру. Это приводит к путанице при определении турбулентных потоков, источников и стоков в определяющей системе уравнений.
2. При описании модели турбулентности SST $k-\omega$, которая использовалась в задаче о расчете эксперимента ONERA по высокоскоростному турбулентному предварительно не перемешанному горению водорода в расширяющемся канале, (LAPCAT II), не указан, какой из механизмов влияния скоростной сжимаемости на гидродинамику течения учтен в этой задаче. При моделируемых числах Маха этот эффект может быть значительным в слоях смешения, в зонах сжатия и расширения потока и т.д..
3. Сравнение кинетических механизмов не позволяет выявить лучший/худший из них или судить об области применимости даже в рамках конкретной задачи, поскольку численная модель настраивается на получение оптимального решения с конкретным кинетическим механизмом. Для полноты исследования следовало бы перебрать набор кинетических механизмов с оптимальными значениями констант для каждого из них.
4. Вывод о незначительном влиянии модели диффузии на структуру течения в модели ONERA LAPCAT-II требует дополнительной проверки. Он может быть обусловлен как тем, что сеточное разрешение было недостаточным для описания молекулярного переноса, так и неточностью использованного в диссертации закона Бланка, который некорректно назван в работе «детальной теорией диффузии».
5. Адекватность подхода URANS при нестационарных колебаниях решения задачи эксперимента ONERA по дозвуковому турбулентному предварительно перемешанному горению метана в канале с обратным уступом (Глава 4) не обоснована теоретически, тем более, если выполняется осреднение по времени такого колебательного процесса. Для этих целей возможно использование гибридных методов RANS/LES или модификаций LES (типа LES WALE).

Указанные недостатки не снижают научную ценность диссертации Вэньчао Лю. Данная диссертационная работа вносит существенный вклад в сферу исследования турбулентного горения, может представлять интерес как с теоретической точки зрения, так и с практической.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диссертация Вэньчао Лю является законченным научным исследованием, которое по актуальности и новизне изложенных результатов, а также по объему проделанной работы соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Вэньчао Лю заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник ФАУ
«Центральный институт авиационного
моторостроения имени П.И. Баранова», отдел 600
«Неравновесные физико-химические процессы в
газовых потоках и элементах реактивных
двигателей», кандидат физико-математических
наук

111116, Россия, Москва, Авиамоторная ул., д. 2.
телефонный номер: раб. 8 (495) 362 9370, моб. 8-
916 682 2459, e.mail: ablebedev@ciam.ru

Лебедев Александр Борисович



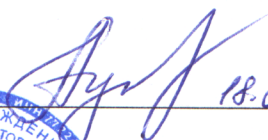
18.08.2023

Подпись Лебедева Александра Борисовича
заверяю. Заместитель генерального директора по
науке ФАУ «Центральный институт
авиационного моторостроения имени П.И.

Баранова», доктор технических наук, доцент

111116, Россия, Москва, Авиамоторная ул., д. 2.
телефонный номер: раб. 8 (495) 362 9370, моб. 8-
916 682 2459, e.mail: avLukovnikovv@ciam.ru

Луковников Александр Валерьевич



18.08.2023 г.

Контактная информация:

Государственный научный центр, федеральное
автономное учреждение «Центральный институт
авиационного моторостроения имени П.И.

Баранова»

111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2,
info@ciam.ru 8 (499) 763-61-67, <https://ciam.ru>

