

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы исследования. Горение в различных энергетических устройствах (двигателях внутреннего сгорания, газотурбинных установках, авиационных двигателях и др.) – сложный процесс, включающий взаимодействие тепловыделения, молекулярного и конвективного переноса с турбулентностью. Численное моделирование таких течений имеет большое практическое значение. Расчет трехмерных течений с горением сопряжен с огромными вычислительными затратами, поэтому на практике приходится использовать упрощенные модели кинетики. Возникающие при редуцировании кинетической схемы погрешности могут влиять на получаемые в расчете структуру течения и характеристики устройства. Поэтому исследование взаимодействия модели кинетики с другими математическими моделями (турбулентности и турбулентного горения) важно для корректного воспроизведения физических процессов в расчетах.

Цель диссертации Вэньчао Лю заключается в том, чтобы на примере моделирования двух классических экспериментов по высокоскоростному перемешанному и низкоскоростному перемешанному турбулентному горению в каналах проанализировать влияние модели химической кинетики на структуру и характеристики течения, получаемые при численном моделировании данных классов течений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 2 приложений и списка использованных источников.

Введение включает обзор литературы, где перечислены основные классы моделей химической кинетики, рассмотрены компьютерные программы для расчетов горения и описаны работы других авторов, в которых демонстрировалось влияние кинетики на результаты расчетов турбулентных течений с горением.

Глава 1 посвящена описанию используемых в диссертации физико-математических моделей. Турбулентные течения с горением в каналах описываются системой нестационарных уравнений Рейнольдса для многокомпонентного реагирующего газа, которые замыкаются моделями турбулентности, горения и взаимодействия турбулентности с горением.

В **Главе 2** с использованием собственной программы решена вспомогательная задача об одномерном распространении ламинарного пламени в предварительно перемешанной смеси. При этом исследованы кинетические механизмы, которые далее применяются для решения основных задач диссертации.

Основные результаты диссертации получены при помощи пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT и описаны в Главах 3 и 4.

В **Главе 3** исследуется высокоскоростное течение с неперемешанным турбулентным горением водорода в экспериментальной модели ONERA LARCAT II. Течение рассматривается в трехмерной постановке. В рамках уравнений Рейнольдса получено стационарное решение задачи. Выполнен анализ факторов, определяющих структуру течения, и за счет выбора параметра шероховатости обеспечено согласование с экспериментальными данными по распределениям давления. После этого сопоставлены и проанализированы результаты расчетов с различными моделями химической кинетики. Сделан вывод о том, что при моделировании высокоскоростного горения в канале модель химической кинетики мало влияет на распределение давления по стенкам канала, но оказывает значительное влияние на трехмерную структуру течения, на распределение тепловых потоков по стенкам канала, а также влияет на полноту сгорания топлива.

В **Главе 4** рассматривается дозвуковое течение с предварительно перемешанным турбулентным горением смеси метана и воздуха в экспериментальной модели ONERA с обратным уступом. Судя по приведенным в автореферате рисункам, в этой Главе используется двумерная постановка задачи. Сначала обеспечено согласование с экспериментальными данными по профилям температуры и продольной скорости с использованием модели турбулентности BSL $k-\omega$ и модели турбулентного горения PaSR. Потом выполнено сопоставление результатов расчетов с различными моделями химической кинетики и дано объяснение неочевидного результата, когда многостадийная модель кинетики (скелетный механизм Smooke25) дала худшее решение, чем глобальные модели кинетики (BFER2, Фролов4). Сделан вывод о том, что при использовании моделей взаимодействия турбулентности и горения, не учитывающих диффузию (например, PaSR), лучшие результаты получаются при использовании не многостадийных кинетических механизмов, а квазиглобальных моделей, которые дают хорошую оценку интеграла тепловыделения. Детальные и скелетные кинетические механизмы можно использовать вместе с моделями турбулентного горения, учитывающими диффузию (например, EPaSR).

Имеются следующие замечания к диссертации:

1. Применяемая автором методология исследования заключается в том, что сначала для фиксированной модели кинетики подбираются остальные параметры задачи из условия наилучшего согласования с экспериментом, а затем фиксируются полученные параметры задачи и сопоставляются разные модели кинетики. Не очевидно, что при использовании других моделей кинетики выбранный набор остальных параметров задачи является оптимальным.
2. В расчете экспериментальной модели ONERA с обратным уступом использованы модели реактора частичного перемешивания (Partially Stirred Reactor, PaSR). Существуют другие модели перемешанного турбулентного горения, например, модели флеймлетов, фронтовые модели горения. В

автореферате отсутствует убедительное обоснование выбора моделей класса PaSR, кроме успешного опыта применения этих моделей в ONERA и ЦАГИ.

3. Имеются замечания по стилю изложения в автореферате. Так, на стр. 11 сказано «была получена нормальная структура пламени», на стр. 24 говорится о «моделировании высокоскоростного горения в канале с существенной ролью самовоспламенения», смысл этих фраз не вполне ясен.

Несмотря на сделанные замечания, можно заключить, что диссертация Вэньчао Лю выполнена на достаточно высоком научном уровне и содержит важные практические рекомендации по использованию кинетических механизмов в численных расчетах турбулентных течений с горением. Результаты исследования обсуждались на авторитетных профессиональных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК («Горение и взрыв») и входящих в базу данных RSCI («Труды МФТИ», «Теплофизика и аэромеханика»).

Диссертация Вэньчао Лю удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно 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 Директор Института проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, заведующий Лабораторией термогазодинамики и горения

член-корреспондент РАН

119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.

Тел.: +7(495)434-34-83

e-mail: yakush@ipmnet.ru

Якуш Сергей Евгеньевич



30.08.2023

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
(ИПМех РАН)

119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Тел.: +7-495-434-34-83, e-mail: ipm@ipmnet.ru

Подпись С.Е. Якуша удостоверяю
Ученый секретарь ИПМех РАН
к.ф.-м.н.

119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Тел.: +7 (495) 434-22-10

e-mail: kotov@ipmnet.ru



М.А. Котов

30.08.2023