

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

Диссертация Вэньчао Лю посвящена анализу влияния модели химической кинетики на структуру и характеристики двух существенно различных классов химически активных турбулентных течений в каналах – высокоскоростного течения воздуха с горением поперечно подаваемого водорода и низкоскоростного горения предварительно подготовленной метано-воздушной смеси.

Модель химической кинетики является существенным элементом физико-математических моделей, использующихся для описания течений газа с горением. Известно, что при необходимости учета конечных скоростей химических реакций различные кинетические механизмы – как упрощенные, так и высоко детализованные – могут давать различные результаты. Область практической применимости детальных кинетических механизмов ограничена чрезвычайно высокими вычислительными затратами, особенно при моделировании течений со сложной геометрией и мелкомасштабными физическими явлениями, требующими использования подробных расчетных сеток. Поэтому важным является подбор упрощенных моделей кинетики и определение границ их применимости, что обуславливает актуальность темы диссертации. Тематика остается недостаточно исследованной, и новые примеры, относящиеся к двум важным классам течений, а также приведенный в диссертации анализ механизмов взаимодействия химической кинетики и газодинамики представляют ценность для вычислителей.

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, 2 приложения и список литературы.

Во **Введении** перечислены существующие модели кинетики горения водорода и метана в воздухе и дана их классификация. Обоснована актуальность расчетов с использованием широко применяемого коммерческого пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT. Описаны предыдущие работы по теме диссертации.

В **Главе 1** приведена математическая постановка задачи. Для описания турбулентных течений с горением используются нестационарные, осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для реагирующих многокомпонентных газовых смесей (многокомпонентные уравнения Рейнольдса). Для замыкания системы уравнений, помимо модели кинетики, применяются модели турбулентности – SST или Baseline $k-\omega$ из работы Ф.Ментера 1994 года – и взаимодействия турбулентности с горением – PaSR, Partially Stirred Reactor.

Глава 2 посвящена решению задачи об одномерном ламинарном пламени, характеристики которого используются в модели PaSR. Задача решена автором с использованием собственной программы. При этом изучены кинетики горения водорода и метана, используемые при решении основных задач диссертации.

В Главе 3 и Главе 4 с использованием коммерческого пакета ANSYS FLUENT в рамках нестационарных уравнений Рейнольдса выполнено численное моделирование двух экспериментов, поставленных во Французской аэрокосмической лаборатории (ONERA):

- 1) эксперимента ONERA LAPCAT-II по сверхзвуковому турбулентному горению водорода, подаваемого со стенок в расширяющийся канал прямоугольного сечения;
- 2) эксперимента P. Magre et al. (1988) по дозвуковому турбулентному горению подготовленной метано-воздушной смеси в канале прямоугольного сечения с обратным уступом.

По каждому эксперименту выполнен анализ определяющих физических факторов и обеспечивается согласование расчета с экспериментальными данными и данными расчетов других авторов. Проведено сравнение и анализ результатов собственных расчетов на основе различных моделей химической кинетики.

На основе серии расчетов по эксперименту со сверхзвуковым горением показано, что модель кинетики мало влияет на распределение давления, но оказывает существенное влияние на трехмерную структуру течения и распределение тепловых потоков по стенкам канала. Также продемонстрировано слабое влияние выбора конкретной модели молекулярной диффузии на структуру течения в экспериментальной модели.

В рамках расчетов по второму эксперименту с дозвуковым горением выполнен подбор коэффициентов модели турбулентного горения PaSR. Необходимость перенастройки основного эмпирического коэффициента модели PaSR связана с применением в работе модели турбулентности (Baseline $k-\omega$), отличной от использованной в ранее выполненных расчетах ЦАГИ (модель $q-\omega$). На основе сравнения расчетов с квазиглобальными моделями кинетики (Фролов4, BFER2) и скелетного механизма Smooke25 рекомендовано использовать квазиглобальные кинетики при использовании моделей взаимодействия турбулентности с горением, не учитывающих пространственный перенос (включая PaSR). Обосновывается возможность применения детальных и скелетных кинетик только вместе с моделями взаимодействия турбулентности с горением, учитывающими пространственный перенос (например, EPaSR).

По автореферату можно сделать следующие замечания:

1. Для лучшего согласования с экспериментом в расчете модели ONERA LAPCAT-II значение одного из настроечных параметров – характерного размера шероховатости – принято равным 200 мкм. Однако по данным ONERA, приведенным в автореферате, высота шероховатости составляет около 100 мкм. Расхождение распределений статического давления на стенке между расчетами с двумя этими значениями параметра весьма велики. Необходим анализ причин столького существенного несоответствия.
2. Подбор основной константы C_t модели турбулентного горения PaSR выполнена на основе единственной задачи, рассмотренной в Главе 4.

Отсутствует обсуждение и обоснование применимости выбранного значения в других задачах. Этот вопрос может быть решен проведением дополнительных расчетов для определения диапазона применимости настроенной модели.

3. Отсутствуют данные по сеточной сходимости расчетов. Из приведенных иллюстраций можно предположить, что расчеты выполнялись на достаточно грубых сетках, тогда как пространственная структура течения и, следовательно, тепловые потоки на стенках моделей могут существенно зависеть от разрешения расчетной сетки.
4. По некоторым вопросам предоставлены неполные данные. В частности, не указано, данные какого эксперимента приведены на рис. 2, а также не назван численный метод, применявшийся для решения системы уравнений в Главе 2.

Сделанные замечания не умаляют достоинства работы и не отменяют общей положительной оценки труда автора. Описанное в автореферате научное исследование выполнено на достаточно высоком научном уровне. Полученные результаты представляют ценность для специалистов в области вычислительной газодинамики реагирующих течений.

Диссертация Вэньчао Лю соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание учебной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Вэньчао Лю заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составил в.н.с. лаборатории
газодинамики взрыва и реагирующих
систем НИИ механики МГУ имени
М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н.

Мичуринский пр., 1, Москва, 119192
+7-495-939-59-77, sutyurin@imec.msu.ru

Олег Георгиевич Сутырин



09.08.2023

Подпись О.Г. Сутырина удостоверяю

Ученый секретарь НИИ механики МГУ
имени М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н.
+7-495-939-56-54, scs@imec.msu.ru

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова
Мичуринский пр., 1, Москва, 119192
+7-495-939-31-21, common@imec.msu.ru



Марина Юрьевна Рязанцева

