

УТВЕРЖДАЮ

Проректор
по научной работе, к.ф.-м.н.

Баган Виталий
Анатольевич



«23» июня 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Диссертация «Влияние модели химической кинетики на результаты численного моделирования турбулентных течений с горением» выполнена на кафедре компьютерного моделирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации с 2017 г. по настоящее время соискатель **Лю Вэньчао** является аспирантом кафедры компьютерного моделирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», трудовую деятельность не осуществлял.

В 2016 г. Лю Вэньчао окончил Харбинский политехнический университет (Китайская Народная Республика) по направлению подготовки «Энергетическое машиностроение и инженерия». В 2017 г. поступил в очную аспирантуру МФТИ по направлению подготовки 24.06.01 Авиационная и ракетно-космическая техника.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2023 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры компьютерного моделирования ИАЛТ ФАКТ МФТИ Власенко Владимир Викторович. Основное место работы – федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт

им. профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ»), заместитель начальника лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением.

По итогам обсуждения диссертации «Влияние модели химической кинетики на результаты численного моделирования турбулентных течений с горением» *принято следующее заключение.*

Тема диссертации является актуальной для развития методологии численного моделирования турбулентных течений с горением при проектировании энергетических устройств и при расчетном сопровождении их экспериментальных исследований, поскольку исследование взаимодействия модели химической кинетики с другими математическими моделями необходимо для правильного воспроизведения физических процессов турбулентного горения.

Цели и задачи диссертации:

Цель диссертации: 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. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. С использованием собственной программы решена задача о распространении ламинарного пламени в предварительно перемешанной смеси и исследованы кинетические механизмы, которые используются далее для решения основных задач диссертации.
2. С использованием коммерческого пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT в рамках нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS) выполнено численное моделирование двух классических экспериментов, поставленных во Французской аэрокосмической лаборатории (ONERA).
3. По каждому эксперименту сначала выполнен анализ определяющих физических факторов и обеспечено согласование расчета с экспериментальными данными и с данными расчетов других авторов. После этого сопоставлены и проанализированы результаты собственных расчетов с использованием различных моделей химической кинетики.

Основные результаты диссертации:

1. Решена задача о высокоскоростном перемешанном турбулентном горении водорода в экспериментальной модели ONERA LAPCAT II. Показано, что при моделировании высокоскоростного перемешанного турбулентного горения в канале с преимущественной 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.

2. Решена задача о дозвуковом предварительно перемешанном турбулентном горении в экспериментальной модели ONERA с обратным уступом. При использовании моделей TCI, не учитывающих диффузию и другие пространственные процессы (например, PaSR), рекомендовано использовать не многостадийные кинетические механизмы, а квазиглобальные модели, которые дают хорошую оценку интеграла тепловыделения. Детальные и скелетные кинетические механизмы можно использовать вместе с моделями TCI, учитывающими пространственный перенос (например, EPaSR).

Все результаты диссертации получены соискателем лично.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведён анализ влияния модели молекулярной диффузии на структуру течения в расширяющемся канале с шероховатостью.
2. Впервые исследовано влияние кинетической модели горения водорода в воздухе на распределение статического давления и тепловых потоков по стенкам канала, на трехмерную структуру течения и на полноту сгорания в экспериментальной модели ONERA LAPCAT II.
3. Впервые дано объяснение причин, по которым модель турбулентного горения PaSR более точно описывает турбулентное диффузионное предварительно перемешанное пламя при использовании глобальных, а не многостадийных кинетических механизмов.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что для двух классов задач (высокоскоростное неперемешанное горение в канале без стабилизаторов горения и низкоскоростное перемешанное горение со стабилизатором горения - уступом) 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 ценность результатов диссертации заключается в том, что описан успешный опыт настройки расчета и модификации математической модели течения при использовании коммерческого пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов

Достоверность результатов исследования обеспечена:

- строгостью и корректностью математических доказательств и рассуждений;
- компьютерным моделированием;
- совпадением результатов исследования с экспериментальными данными и расчетами других авторов;

- сопоставлением результатов расчетов на разных сетках и расчетов с использованием различных моделей турбулентности, химической кинетики и турбулентного горения;
- Положения и выводы, сформулированные в диссертации, получили квалифицированную апробацию на международных и российских научных конференциях, и семинарах. Достоверность также подтверждается публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждена:

- сопоставлением результатов исследования с данными зарубежного и отечественного опыта;
- подробными расчетами полученных выводов и закономерностей;
- подтверждением результатов экспертными оценками специалистов;
- обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях;
- публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Материалы диссертации опубликованы автором достаточно полно в следующих работах:

Статьи, индексируемые базой данных Scopus и RSCI.

1. [Scopus] Лю В. Анализ факторов, определяющих структуру численного решения при расчете течения с горением в экспериментальной модели ONERA // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 3. – С.539-556.
2. [RSCI] Лю В. Влияния модели химической кинетики на результаты численного моделирования турбулентных течений с горением // Труды МФТИ. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 133-152.

Статьи в журналах из списка ВАК РФ.

3. [РИНЦ] Власенко В.В., Лю В., Молев С.С. Сабельников В.А. Влияние условий теплообмена и химической кинетики на структуру течения в модельной камере сгорания ONERA LAPCAT II // Горение и взрыв. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 36-47.
4. [РИНЦ] Лю В. Опыт численного моделирования турбулентного горения метано-воздушной смеси в канале с уступом с использованием пакета вычислительной аэродинамики Ansys Fluent на базе различных моделей химической кинетики // Горение и взрыв. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 89-106.

Личный вклад соискателя в работе с соавторами [3] заключается в подготовке кинетических механизмов для включения в программу **zFlare** и в анализе результатов численного моделирования течений с горением в каналах подогревателя и экспериментальной модели ONERA.

Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. The First International Aerospace Symposium «The Silk Road», December 06-08, 2018, Moscow;
2. 13-я научная конференция по горению и взрыву, 12-14, февраля 2020 г. ФИЦ ХФ РАН, Москва;
3. The 21st International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022), August 8-14, 2022, Novosibirsk;
4. 16-я научная конференция по горению и взрыву, 8-10, февраля 2023 г. ФИЦ ХФ РАН, Москва;
5. Научный семинар кафедры информатики МФТИ под председательством члена-корреспондента РАН И.Б.Петрова, 20 апреля 2023 г., МФТИ, г.Долгопрудный.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, в частности, пунктам:

- п. 4 – Ламинарные и турбулентные течения.
- п. 5 – Течения сжимаемых сред и ударные волны.
- п. 9 – Физико-химическая гидромеханика (течения с химическими реакциями, горением, детонацией, фазовыми переходами, при наличии излучения и др.).
- п. 12 – Пограничные слои, слои смешения, течения в следе.
- п. 19 – Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред.

Диссертация «Влияние модели химической кинетики на результаты численного моделирования турбулентных течений с горением» Лю Вэньчао рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.**

Заключение принято на заседании кафедры компьютерного моделирования ИАЛТ ФАКТ МФТИ. Присутствовало на заседании 12 человек. Результаты голосования: «за» – 12 чел., «против» – 0, «воздержались» – 0, протокол № 2 от 23 июня 2023 года.



Савельев Андрей Александрович,
к. т. н., заведующий кафедрой
компьютерного моделирования
ИАЛТ ФАКТ МФТИ



Подпись Савельева А.А. заверен / Морозовым И.А.