

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.224.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ»
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ ИУ РАН) ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 14 сентября 2023 г. № 8

О присуждении Лю Вэньчао, гражданину Китайской Народной Республики ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние модели химической кинетики на результаты численного моделирования турбулентных течений с горением» по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 06 июля 2023 г. (протокол № 7) диссертационным советом 24.1.224.02, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и Управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН), находящегося по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, приказ о создании диссертационного совета № 1337/нк от 24.10.2022.

Соискатель – Лю Вэньчао, 1991 года рождения, в 2016 г. окончил Харбинский политехнический университет (Китайская Народная Республика) по направлению подготовки Энергетическое машиностроение и инженерия. С 16.10.2017 по 26.08.2023 обучался в очной аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 24.06.01 Авиационная и ракетно-космическая техника.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Власенко Владимир Викторович, заместитель начальника Лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением (Лаборатория №14 научно-исследовательского отдела № 1 Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского).

Официальные оппоненты:

- 1) Федорова Наталья Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН «Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН», ведущий научный сотрудник лаборатории № 12 «Волновые процессы в ультрадисперсных средах».
- 2) Лебедев Александр Борисович, кандидат физико-математических наук, ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», ведущий научный сотрудник Отдела 600 «Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и в элементах реактивных двигателей».

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация ФГБУН «Федеральный исследовательский центр химической физики имени Н.Н. Семёнова Российской академии наук» (ФИЦ ХФ РАН), город Москва, в своем положительном отзыве, утвержденном и.о. директора ФИЦ ХФ РАН доктором физико-математических наук профессором Чертовичем Александром Викторовичем и подписанном заместителем руководителя Отдела горения и взрыва ФИЦ ХФ РАН, заведующем Лаборатории горения, главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук Крупкиным Владимиром Герцовичем, указала, что в диссертации решена задача, имеющая важное значение для развития численного моделирования горения в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок – задача о влиянии кинетической модели на результаты расчета двух важных классов турбулентных течений в каналах.

Диссертация была рассмотрена на семинаре в Отделе горения и взрыва ФИЦ ХФ РАН 20 июля 2023 г., протокол № 6. Доклад Лю Вэньчао получил положительную оценку. Диссертация Лю Вэньчао 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 присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Лю Вэньчао заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискатель имеет 4 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 4 работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, 3 из которых – в журналах из списка ВАК (в том числе 1 из базы данных RSCI), 1 – в журнале из базы данных Scopus:

1. 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.
2. 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.
3. Лю В. Влияние модели химической кинетики на результаты численного моделирования турбулентных течений с горением // Труды МФТИ, 2023, Т. 15, № 2. С. 133-152.
4. 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.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На автореферат диссертации поступило 2 положительных отзыва:

1. от ведущего научного сотрудника лаборатории газодинамики взрыва и реагирующих систем НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидата физико-математических наук Сутырина Олега Георгиевича;
2. от директора Института проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН, заведующего Лабораторией термогазодинамики и горения, члена-корреспондента РАН Якуша Сергея Евгеньевича.

В отзывах на автореферат диссертации отмечается, что диссертация Лю Вэньчао удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), а приведенные замечания не умаляют достоинства работы и не отменяют общей положительной оценки труда автора. Указано, что описанное в автореферате научное исследование выполнено на достаточно высоком научном уровне, а полученные результаты представляют ценность для специалистов в области вычислительной газодинамики реагирующих течений.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что ФИЦ ХФ РАН обладает признанным в России авторитетом в области науки, связанной с разработкой и практическим применением моделей химической кинетики. Выбор официальных оппонентов обосновывается их научными достижениями и компетентностью в области численного моделирования течений с турбулентностью и горением.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- 1) предложена эффективная методология анализа возможного влияния модели химической кинетики на результаты расчета некоторого класса

течений, и на примере двух важных классов турбулентных течений с горением в каналах продемонстрировано ее применение;

2) предложены научно обоснованные разработки (требования к кинетической схеме при использовании модели реактора частичного перемешивания и модернизация этой модели для выбранного подхода к описанию течения);

3) показано, что при использовании различных кинетических механизмов горения можно получить близкие распределения давления вдоль канала, но существенно разные трехмерные структуры течения и распределения тепловых потоков по стенкам канала;

4) показано, что при численном моделировании турбулентного течения с горением простая квазиглобальная модель кинетики может обеспечить лучшее совпадение с экспериментом, чем многостадийный кинетический механизм широкого спектра применимости;

5) изучено влияние модели молекулярной диффузии на структуру течения в расширяющемся канале с шероховатостью.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

1) раскрыты важные механизмы взаимодействия химической кинетики с другими физическими процессами при неперемешанном горении водорода в высокоскоростном потоке воздуха в канале без стабилизаторов горения и при низкоскоростном перемешанном горении метано-воздушной смеси в канале со стабилизатором горения;

2) проведена настройка констант модели турбулентного горения PaSR при ее использовании в сочетании с моделью турбулентности BSL $k-\omega$;

3) раскрыты причины, по которым модель турбулентного горения PaSR более точно описывает турбулентное диффузионное предварительно перемешанное пламя при использовании глобальных, а не многостадийных кинетических механизмов;

4) изложены рекомендации по выбору модели химической кинетики при использовании модели турбулентного горения PaSR.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1) представлен успешный опыт настройки расчета турбулентного течения с горением на базе коммерческого пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT;

2) разработаны и внедрены модификации математической модели течения при использовании пакета ANSYS FLUENT;

3) создана собственная программа для решения задачи о распространении ламинарного пламени;

4) представлены практические рекомендации по использованию модели кинетики при описании высокоскоростного перемешанного турбулентного горения водорода в расширяющемся канале и низкоскоростного предварительно перемешанного турбулентного горения смеси углеводородов с воздухом в канале с обратным уступом.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что построенные автором расчетно-теоретические модели течений допускают возможность повторения полученных результатов и согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации. Идея предложенной автором методологии исследования влияния кинетической модели базируется на применении двухэтапной процедуры. На первом этапе подбираются параметры физико-математической модели течения, обеспечивающие наилучшее согласование результатов расчетов и экспериментальных данных. Это обеспечивает получение в расчете близкой к реальности структуры течения. На втором этапе сравниваются различные кинетические механизмы при фиксированных параметрах модели течения, что гарантирует выявление эффектов, обусловленных исключительно моделью кинетики. Установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными другими авторами и с опубликованными экспериментальными данными. Использовано сопоставление расчетов на базе разных физико-математических моделей.

Личный вклад соискателя состоит в разработке программы для моделирования распространения ламинарного пламени; построении геометрий и расчетных сеток; настройке расчетов и модификации моделей течения в ANSYS FLUENT; проведении расчетов с использованием собственной программы и ANSYS FLUENT; обработке и анализе экспериментальных данных; подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты были заданы вопросы, уточняющие используемые в диссертации обозначения и главные полученные результаты. Кроме этого, были высказаны критические замечания, касающиеся употребления термина “детальная теория” в отношении приближенной модели многокомпонентной молекулярной диффузии, корректности использования модели горения водорода без пероксидов при низких температурах, а также о слишком большой по сравнению с экспериментом высоте шероховатости, принятой в расчетах. Был задан уточняющий вопрос относительно трактовки выражения “высокоскоростное горение в канале с существенной ролью самовоспламенения”, фигурирующего в выводах. В качестве критического замечания было указано на слишком высокую температуру стенок подогревателя, полученную экстраполяцией на стенку подогревателя, измеренного в эксперименте профиля температуры с учетом недостаточности разрешения сетки для описания пограничного слоя и отсутствия измерений в эксперименте. Было указано на необходимость сопоставления результатов, полученных в задаче из Главы 3, с точной теорией многокомпонентной диффузии; на целесообразность проведения нестационарных вихреразрешающих расчетов в задаче из Главы 4; на необходимость исследования влияния переменных турбулентных чисел Прандтля и Шмидта, а также на целесообразность проверки введенной автором константы модели PaSR применительно к другим тестам. Был задан уточняющий вопрос о механизме возникновения воспламенения в зоне отрыва в контексте предположения о задержке воспламенения в расчете с 7 реакциями (по сравнению с 19 и 22 реакциями), связанной с замедленным тепловыделением при ис-

пользовании кинетической схемы с 7 реакциями. Кроме того, был задан вопрос о “тонких структурах”, рассматриваемых в модели PaSR, которые не воспроизводятся в расчете непосредственно, но при этом учитывается их объемная доля, определяемая по локальным характеристикам течения. Также был задан уточняющий вопрос о полученных в расчетах Главы 3 значениях коэффициентов выгорания топлива с 7 реакциями, где получена полнота сгорания 0.9, и с 19 и 22 реакциями, где полнота сгорания уже 0.95.

Соискатель Лю Вэньчао согласился с высказанными замечаниями и ответил на все заданные ему в ходе заседания вопросы, приводя по каждому из них собственную аргументацию, основанную на материалах доклада и диссертации.

В ходе дискуссии диссертационный совет пришел к выводу, что представленная диссертация может быть охарактеризована как научно-квалификационная работа, содержащая решение задачи турбулентного горения в каналах со сложной структурой течения при наличии отрывных зон, ударных волн и теплообмена со стенками канала. Диссертант модифицировал модель турбулентного горения PaSR и реализовал ее в программе для модуля ANSYS FLUENT. В работе показано, что за счет разного протекания химической реакции можно получить разную структуру отрывных зон и разное распределение тепловых потоков по стенкам канала, несмотря на близкие продольные распределения давления. Были выявлены механизмы, связанные со взаимодействием кинетики с моделью течения. Это позволило объяснить, почему модель PaSR лучше работает с простыми кинетическими схемами, а не с высокоточными многостадийными механизмами (что никто не мог объяснить ранее). Были сделаны рекомендации по устройству модели турбулентного горения для работы с высокоточными кинетическими схемами, что является важным вкладом в развитие моделей турбулентного горения. Объем и методическая организация выполненной работы, сложность решенных вполне подтверждают научную квалификацию автора.

На заседании 14 сентября 2023 г. диссертационный совет постановил: за решение научной задачи о влиянии кинетической модели на результаты расчета двух важных классов турбулентных течений в каналах с высокоскоростным неперемешанным горением без стабилизаторов пламени и с низкоскоростным предварительно перемешанным горением за ступенчатым стабилизатором, имеющей важное значение для развития численного моделирования горения в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей и газотурбинных установок, присудить Лю Вэньчао ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 19, против 0 недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета 24.1.224.02
академик РАН



Ю.Г. Евтушенко

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.224.02
к.ф.-м.н.



В.И. Никонов

15.09.2023