

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Ваньковой Ольги Сергеевны «Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения в предварительно не перемешанных водородно-воздушных потоках при сверхзвуковых скоростях»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Ваньковой Ольги Сергеевны посвящена численному исследованию процессов смешения, воспламенения и горения водородно-воздушных топлив в высокоскоростных течениях. Исследуемые автором процессы имеют важное теоретическое и прикладное значение для газовой динамики и аэродинамики внутренних течений. Разработка фундаментальных основ численного моделирования сверхзвуковых турбулентных реагирующих течений с учетом смешения и горения водородного топлива и исследование с помощью математического моделирования таких течений являются **актуальными**, что подтверждается многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных авторов.

Научная новизна работы заключается в том, что проведены численные исследования в широком диапазоне параметров потока и состава смесей. Показана эффективность выбранных моделей и численных алгоритмов. Проведена верификация кинетических схем на экспериментальных данных различных авторов, получено хорошее качественное и количественное согласование расчетных и экспериментальных данных по широкому набору параметров. В частности, впервые выполнены детальные сравнения расчета и эксперимента Cohen – Guile, в условиях которого дополнительно исследовано влияние внешних параметров и состава воздушной струи на горение спутной струи водорода. Выполнены расчетные исследования и проведено сопоставление с экспериментальными данными, полученными в высокоэнтальпийной импульсной аэродинамической установке ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Полученная в расчетах подробная информация о параметрах потока позволила детально изучить процессы смешения, самовоспламенения смеси и стабилизации пламени при сверхзвуковых скоростях потока. Впервые в расчете получены все наблюдающиеся в эксперименте стадии нестационарного горения, а также режим с выходом волны горения в зону инъекции («тепловое запираение канала»).

Достоверность полученных результатов подтверждается верификацией физико-математических моделей на экспериментальных данных в широком диапазоне изменений начальных параметров и геометрии канала, соответствием результатов расчетов и экспериментальных данных, тестированием сеточной сходимости расчетов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования научных выводов работы в учебном процессе при чтении спецкурсов для студентов старших курсов и аспирантов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 170 наименований. Материал изложен на 181 странице, включает 15 таблиц, 86 рисунков и схем.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и дан основательный обзор зарубежных и отечественных источников литературы по теме исследований. Проанализированы экспериментальные данные по турбулентному горению в сверхзвуковом потоке. Особое внимание уделено работам, пригодным для валидации физических моделей, которые включают данные измерений определяющих характеристик – температуры, давления, состава газа и др.

В первой главе описаны используемые математические модели и методы расчета. Приведена система осредненных по Фавру/Рейнольдсу уравнений Навье - Стокса для многокомпонентного вязкого теплопроводного газа. Уравнения замкнуты дифференциальной моделью турбулентности $k-\omega$ SST и дополнены блоком уравнений химической кинетики. Описаны подходы и методы приближенного решения дифференциальных уравнений. С помощью метода конечных объемов, который лежит в основе используемого в работе программного комплекса Ansys Fluent, система интегральных законов сохранения массы, импульса, энергии и других величин преобразована к системе алгебраических уравнений относительно искомых величин – плотности, скорости, температуры и др. в центрах расчетных ячеек. В расчетах использованы оба доступных в программе Fluent решателя, основанных на решении уравнений для давления и для плотности. При расчете нестационарных течений использованы неявные по времени схемы второго порядка с итерационной и безытерационной реализацией на каждом временном шаге. Для аппроксимации конвективных слагаемых уравнений использована противопотоковая схема второго порядка. Вблизи стенок и в областях высоких градиентов сетка была адаптирована средствами программного комплекса.

Во второй главе представлены результаты тестирования нескольких кинетических схем горения водорода по времени задержки воспламенения. Показано, что все исследованные кинетические механизмы горения водорода в воздухе могут быть использованы для численного моделирования в диапазонах давления 0,27 – 4 атм и температур 800 – 3000 К.

Так же проведено сравнение различных подходов моделирования горения водородно-воздушных смесей. Для тестирования выбраны эксперименты J.S. Evans et al. (1978); M. Burrows – A. Kurkov (1971); Cohen – Guile (1969), в которых исследовано горение предварительно не перемешанных водородно-воздушных смесей. Показано, что лучшее совпадение с экспериментом дает подход, основанный на конечной скорости реакции с использованием детального кинетического механизма, состоящего из 37 реакций. Учет нестационарности течения позволяет получить нестационарные вихревые структуры, формирующиеся на границе слоя горения, которые оказывают существенное влияние на процессы смешения топлива и окислителя, воспламенение и стабилизацию горения, а также толщину слоя горения. Поскольку во всех рассмотренных задачах горение осуществляется по смешанному диффузионно-кинетическому механизму, учет влияния взаимодействия турбулентности и химических превращений с использованием EDM не приводит к улучшению предсказания параметров течений и концентраций компонентов смеси.

В третьей главе представлены результаты параметрических исследований влияния внешних параметров на смешение, воспламенение и горение водородно-воздушных смесей. Изменение параметров затопленного пространства показало, что при уменьшении давления и температуры затопленного пространства «бочкообразная» структура реагирующего течения становится более четкой, размер «бочек» увеличивается, перепад давления и числа Маха на оси струи растет. Увеличение доли паров воды в струе воздуха приводит к росту времени задержки воспламенения. Место прихода пламени на ось смещается от среза сопла, а также повышается максимальная концентрация паров воды в струе пламени, которая стабилизируется в дальнем следе струи. Воздействием электронного пучка при низких температурах смеси ($T_{st} < 800$ К) и высоких числах Маха потока, можно добиться воспламенения смеси по всей высоте канала и устойчивости горения. Пламя стабилизируется в областях с низкими скоростями: за уступами, в каверне и вблизи стенок канала. Стабилизации пламени по всей высоте канала не происходит из-за высоких скоростей. Выявлено, что для рассмотренных условий каверна является предпочтительным средством для стабилизации пламени при искусственном воспламенении.

В четвертой главе представлены результаты численного исследования процессов смешения, воспламенения и стабилизации горения для условий

экспериментов, проведенных в импульсной трубе ИТ 302М ИТПМ СО РАН в режиме присоединённого трубопровода. Разработана методика задания нестационарных условий на входе в канал, соответствующих условиям эксперимента в импульсной аэродинамической установке. Методика протестирована на задаче о «холодном» течении воздуха при $M = 4$ на входе в канал. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментом. Показано, что структура и безразмерные параметры остаются неизменными, что позволяет реализовать нестационарные расчеты реагирующих течений как последовательность задач со стационарными условиями. Показано, что в зависимости от входных условий наблюдается стабилизация горения или развивается тепловое заклинивание канала с выходом ударной волны и волны горения в секцию инъекции. Изучены этапы нестационарного процесса развития горения в канале, установлено их качественное соответствие с экспериментальными картинками. Получены количественные характеристики о полноте сгорания топлива и статической температуре.

В заключении сформулированы общие выводы, резюмирующие все проведенные численные исследования.

В качестве **замечаний** к работе можно отметить:

1. Отмечая детальность описания физико-математической модели, надо признать, что ему не всегда хватает строгости изложения. Так, основные уравнения газодинамики записаны для осредненных по Фавру переменных, но, в тоже время, уравнения модели турбулентности записаны для средних по времени (Рейнольдсу), а в модели взаимодействия турбулентности и химических реакций вид осреднения вообще не указан.

2. В продолжение темы осреднения уравнений газодинамики: ясно, что результаты, получаемые в работе – величины осредненные по Фавру. Насколько справедливо их прямое сравнение с экспериментальными данными, которые, очевидно, представляют собой некоторую форму осреднения по Рейнольдсу. Производились ли какие-то оценки по отличию таких средних?

3. Несмотря на то, что основное внимание в работе уделено особенностям моделирования химической кинетики горения, но выбор модели турбулентности и модели «турбулентной» скорости химических реакций следовало бы обосновать более четко.

4. Неясна методология получения «стационарного» решения (стр. 50-51 и рис. 2.6). Насколько вообще применимы стационарные уравнения к описанию заведомо нестационарного течения?

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и ее результатов.

Диссертационная работа «Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения в предварительно не перемешанных водородно-воздушных потоках при сверхзвуковых скоростях» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу по актуальной тематике, и содержит новые научные и практически значимые результаты, полученные в значительном объеме и с использованием современных методов математического моделирования. Полученные в работе результаты соответствуют поставленным целям и задачам. Тема содержания диссертации соответствует научной специальности 1.1.9 - механика жидкости, газа и плазмы.

Список публикаций автора по теме диссертации включает 27 печатных работ, из которых 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, и 9 статей в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

Считаю, что представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям "О порядке присуждения ученых степеней" ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Ванькова Ольга Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - механика жидкости, газа и плазмы.

Терехов Владимир Викторович, профессор РАН, доктор физико-математических наук (01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), заведующий лабораторией, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (ИТ СО РАН, <http://www.itp.nsc.ru/>)
Адрес: 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Ак. Лаврентьева, 1
Тел. 8913486. e-mail: vt@itp.nsc.ru

«28» декабря 2022 г.

Подпись Терехова

Ученый секретарь
к.ф.-м.н.

Макаров М.С.

Я, Терехов Владимир Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Председателю диссертационного совета Д 003035.02
академику В.М. Фомину

ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Я, Терехов Владимир Викторович, даю свое согласие выступить в качестве официального оппонента по диссертации Ваньковой Ольги Сергеевны на тему: «Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения в предварительно не перемешанных водородно-воздушных потоках при сверхзвуковых скоростях» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	доктор физико-математических наук
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника
Ученое звание	
Академическое звание	Профессор РАН
Тел:	8 (913) 486 .
E-mail:	vt@itp.nsc.ru
Должность	Заведующий лабораторией
Подразделение организации	2.2. Лаборатория термогазодинамики
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования РФ
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Web-сайт организации.	http://www.itp.nsc.ru/
Телефон организации.	+7(383) 330-90-40
E-mail организации.	director@itp.nsc.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею 68 научных работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название	Издательство, журнал, год, №, страницы	Вид, год
1	Ocheredko A.I., Pakhomov M.A., Terekhov V.V. , Terekhov V.I.	Numerical modeling of flow pattern and heat transfer at injection of counter-flowing wall jet	Journal of Engineering Thermophysics. T. 30. № 2. С. 225-234.	Статья, 2021

2	А. В. Барсуков, В. В. Терехов , В. И. Терехов	Влияние пассивного возмущения на структуру течения и теплообмен в отрывной области за обратной ступенькой	ТВТ, Т. 59, N 1, С. 126–132	Статья, 2021
3	Пахомов М.А., Терехов В.В. , Филиппов М.В., Чохар И.А., Шаров К.А., Терехов В.И.	Структура течения в пристенной газовой завесе при ее вдуве через круглые отверстия, расположенные в поперечной траншее	Теплофизика и аэромеханика, Т. 28. № 3. С. 331-341.	Статья, 2021
4	Sangadiev A. L., Terekhov V. V.	Application of lattice Boltzmann method for studying interaction dynamics of parallel plane minijets	Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1565, P. 012069.	Статья, 2020
5	Barsukov A. V., Terekhov V. V. , Terekhov V. I.	Effect of the channel divergence ratio on heat transfer in a turbulent flow around the rib-step system	Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1677, P. 012004.	Статья, 2020
6	Barsukov A. V., Terekhov V. V. , Terekhov V. I	Control of a separated flow behind a back-facing step by means of tabs	Journal of Physics: Conference Series. 1666, 1, 012005.	Статья, 2020
7	Starinskaya E.M., Miskiv N.B., Nazarov A.D., Terekhov V.V. , Terekhov V.I., Rybdylova O., Sazhin S.S.	Evaporation of water/ethanol droplets in an air flow: experimental study and modelling	International Journal of Heat and Mass Transfer. Т. 177. P. 121502.	Статья, 2021
8	Barsukov A.V., Terekhov V.V. , Terekhov V.I.	Numerical simulation of flow dynamics and heat transfer in a rectangular channel with periodic ribs on one of the walls	Journal of Physics: Conference Series. "XXXVII Siberian Thermophysical Seminar, STS 2021" 2021. С. 012028.	Статья, 2021
9	Philippov M.V., Chokhar I.A., Terekhov V.V. , Terekhov V.I.	Experimental study of the heat transfer of two parallel impinging jets	Journal of Physics: Conference Series. "XXXVII Siberian Thermophysical Seminar, STS 2021" С. 012029.	Статья, 2021
10	Терехов В.В. , Терехов В.И.	Влияние проницаемости поверхности на структуру отрывного турбулентного течения и теплообмен за обратным уступом	Прикладная механика и техническая физика. Т. 58. № 2 (342). С. 78-89.	Статья, 2017

11	Бочкарева Е.М., Лей М.К., Терехов В.В. , Терехов В.И.	Особенности методики экспериментального исследования процесса испарения подвешенных капель жидкости	Инженерно- физический журнал. Т. 92. № 5. С. 2208-2217.	Статья, 2019
----	---	--	--	--------------

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

28.09.2022

Терехов Владимир Викторович

*Согласен Терехов В.В. уполномочен
личной печатью
в.с.*

Мамзнов М.С.