

Директор ФГБУН Института
теоретической и прикладной механики

им.

доктор

чл.-корр. РАН _____

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация «Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения в предварительно перемешанных водородно-воздушных потоках при сверхзвуковых скоростях» выполнена в лаборатории №12 «Волновых процессов в ультрадисперсных средах» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Ванькова Ольга Сергеевна работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории №12 «Волновых процессов в ультрадисперсных средах» в должности старшего лаборанта с высшим профессиональным образованием и младшего научного сотрудника.

В 2017 г. окончила магистратуру факультета летательных аппаратов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по направлению подготовки 24.04.03 «Баллистика и гидроаэродинамика». В 2021 г. окончила аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по направлению подготовки 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов №798 выдана 31 мая 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования Новосибирским национальным исследовательским государственным университетом.

Научный руководитель: Федорова Наталья Николаевна, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник лаб. №12 «Волновых процессов в ультрадисперсных средах» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Диссертация посвящена разработке и тестированию вычислительной технологии для исследования сверхзвуковых внутренних турбулентных течений с учетом смешения и горения водородного топлива.

2. Актуальность темы.

Проблема инициирования воспламенения и устойчивого горения водорода в сверхзвуковых потоках является одной из ключевых задач внутренней аэродинамики. Большие скорости потока ($M > 3$) и малое время пребывания смеси в камере сгорания (~ 1 мс) осложняют процессы смешения и воспламенения. Для улучшения смешения, воспламенения топлив и стабилизации горения используют различные геометрии канала и способы подачи топлива. Сложная волновая структура внутренних сверхзвуковых турбулентных течений в каналах с многочисленными ударными волнами и отрывами пограничного слоя оказывает существенное влияние на процессы смешения, самовоспламенения и стабилизации горения. Исследование процессов турбулентного горения при больших скоростях является важной фундаментальной задачей, имеющее также прикладное значение с точки зрения повышения эффективности энергетических установок, снижения расхода топлива и образования загрязняющих веществ.

Одним из важных сырьевых ресурсов будущего является водород, который применяется в виде топлива в различных условиях. Использование водородного топлива способствует повышению эффективности энергетических установок, снижению расхода топлива и образования загрязняющих веществ. Для разработки методов управления процессами самовоспламенения и стабилизации горения водородных топлив необходимо выполнить исследования процессов в широком диапазоне физических и геометрических параметров.

Трудность данного научного направления в теоретическом плане заключается в тесном взаимодействии физико-химических явлений, основными из которых являются сложная газодинамическая структура течений, турбулентность, теплообмен и химические реакции. Использование экспериментальных методов ограничивается невозможностью реализовать необходимый уровень физических параметров. Рассмотрение большого количества геометрий канала и способов инъекции топлива требует больших финансовых затрат. Так же остро стоит вопрос о сравнении данных,

полученных в различных установках, масштабируемости результатов, переносе данных, полученных в наземных установках на реальные условия полета. Кроме этого, экспериментальные данные, как правило, включают весьма ограниченный набор физических величин. Математическое моделирование является эффективным методом изучения сверхзвуковых течений реагирующих газовых смесей, поскольку позволяет в широком диапазоне входных условий получить поля всех физических переменных задачи, которые можно визуализировать и обрабатывать для анализа мгновенных, средних или интегральных параметров. Для использования математического моделирования исследования необходима надежная вычислительная технология, основанная на полных математических моделях и современных численных алгоритмах, которая проверена на экспериментальных данных и устойчиво работает в широком диапазоне параметров. Комплексное использование экспериментальных и численных методов позволяет исследовать этот сложный класс задач с высокой степенью достоверности и получить полный набор физических величин, характеризующих существенно нестационарный процесс горения.

3. Научная новизна работы.

1. . Функционал пакета ANSYS Fluent расширен путем внедрения в него детальных кинетических схем горения водорода, пользовательских функций и выражений для реализации нестационарных входных условий. Разработана вычислительная технология для моделирования существенно нестационарных турбулентных высокоскоростных реагирующих течений.

2. Проведена верификация кинетических схем и расчетного алгоритма на экспериментах 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 Коэна и др. (1969), в условиях которого дополнительно исследовано влияние внешних параметров на структуру горячей сверхзвуковой струи водорода.

3. Выполнены расчетные исследования и проведено сопоставление с экспериментальными данными, полученными в высокоэнтальпийной импульсной аэродинамической установке ИТ-302М ИТПМ СО РАН. Полученная в расчете подробная информация о параметрах потока позволила детально изучить процессы смешения, самовоспламенения смеси и стабилизации пламени при высоких сверхзвуковых скоростях потока ($M=4$). Впервые в расчете получены все наблюдающиеся в эксперименте стадии нестационарного горения, а также режим с выходом волны горения в зону инжекции («тепловое запираание канала»).

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

5. Научная значимость работы заключается в использовании разработанной вычислительной технологии для исследований нестационарных процессов смешения, воспламенения и стабилизации горения для течений с химическими реакциями при сверхзвуковых скоростях потока. **Практическая значимость** заключается в возможности использования выводов работы в учебном процессе при чтении спецкурсов (гидрогазодинамика, течения с физико-химическими превращениями) для студентов старших курсов и аспирантов.

6. Личный вклад автора.

Автор лично провел тестирование кинетических схем горения водорода по временам задержки воспламенения, разработал и протестировал методику задания нестационарных условий на входе в канал камеры сгорания, выполнил тестовые 2D расчеты воспламенения водородных струй в потоке горячего воздуха и параметрические расчеты по исследованию влияния условий во внешнем потоке и затопленном пространстве на полноту сгорания водорода; выполнил серию расчетов по воспламенению предварительно перемешанной стехиометрической водородо-воздушной смеси в каналах различной конфигурации при энергетическом воздействии; участвовал в 3D расчетах нестационарных течений в каналах при числе Маха $M=4$ на входе, обработке их результатов и анализе режимов горения, включая режим с тепловым запиранием канала. Опубликовал основные результаты в рецензируемых журналах. Результаты работы были доложены автором на конференциях, в том числе международных.

7. На публичную защиту выносятся результаты численного моделирования 2D и 3D турбулентных течений предварительно неподготовленных водородно-воздушных смесей при сверхзвуковых скоростях, включающие:

- данные о полях основных газодинамических и турбулентных параметров, а также концентраций химических компонентов;
- описание процессов смешения и самовоспламенения водородо-воздушной смеси, развития процесса горения во времени в широком диапазоне скоростей, температур и составе смесей;
- оценки полноты сгорания водорода и влияния на нее коэффициента избытка топлива и внешних условий;

- детальное описание процесса теплового запираания канала, приводящее к переходу к дозвуковому режиму горения.

8. Апробация работы.

Результаты, полученные в рамках работы над исследованием, представлялись и обсуждались на следующих научно-методических семинарах и конференциях:

- Научные семинары под руководством академика РАН Фомина В.М.; д.ф.-м.н., профессора Федорова А.В.; к.ф.-м.н. Бедарева И.А. (ИТПМ СО РАН);
- XIV, XV, XVI и XVII Всероссийские семинары «Динамика Многофазных Сред» (Новосибирск, 2015, 2017, 2019 и 2021 гг.);
- XVI Всероссийская научно-технической конференция «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, 2015 г.);
- XI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях, NPNJ - 2016 (Крым, Алушта, 2016 г.);
- IX, XII, XIII Всероссийские научно-технические конференции «Актуальные вопросы строительства» (Новосибирск, 2016, 2019 и 2020 гг.);
- Всероссийские конференции молодых ученых «Проблемы механики» (Новосибирск – Шерегеш, 2018, 2019, 2020 и 2022 гг.);
- XXXIII и XXXVIII Всероссийские конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2017 и 2021 гг.);
- 7 Европейский конгресс по вычислительным методам в прикладной науках и инженерии, ECOMMAS (2016 г.);
- XVIII, XIX и XX Международные конференции по методам аэрофизических исследований, ISMAR (Пермь, Новосибирск, 2016, 2018 и 2020 гг.)

9. Публикации.

По теме диссертации опубликовано 36 работ, в том числе 5 в научных изданиях, рекомендованных ВАК и 9 статей в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science.

В изданиях, рекомендованных ВАК при МОиН РФ:

1. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Гольдфельд М.А., Управление процессами воспламенения и стабилизации горения в сверхзвуковой камере сгорания, Вестник НГУ. Серия: Физика, 2016, №2, с.46-55.

2. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Моделирование воспламенения и горения спутной водородной струи в сверхзвуковом потоке воздуха, Физика горения и взрыва 2021, Т. 57, №4, с. 18-28.

3. Ванькова О.С., Федорова Н.Н. Воспламенение холодной водородной струи в спутной коаксиальной струе горячего влажного воздуха при истечении в затопленное пространство, Теплофизика и аэромеханика 2021, №6, с. 935-950.

4. Федорова Н.Н., Ванькова О.С., Гольдфельд М.А. Нестационарные режимы воспламенения и стабилизации горения водорода в канале, Физика горения и взрыва 2022, Т. 58, №2, с. 3-11.

5. Федорова Н.Н., Ванькова О.С., Влияние параметров внешней среды на воспламенение и горение сверхзвуковой водородной струи, истекающей в затопленное пространство, Физика горения и взрыва 2022, Том 58, №3, с. 19-31.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций, индексируемых в Web of Science и/или Scopus:

6. Y.V. Zakharova, N.N. Fedorova, S.A. Valger, M.A. Goldfeld, O. Vankova, "Numerical simulation of hydrogen jet injection and ignition in supersonic flow," ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering 4, 7237-7246, (2016). (DOI:10.7712/100016.2329.11006)

7. O.S. Vankova, S.A. Valger, M.A. Goldfeld, Y.V. Zakharova, N.N. Fedorova, "Simulation of mixing and ignition of hydrogen in channels at supersonic speeds," AIP Conference Proceedings 1770, pp. № 040016, (2016). (DOI:10.1063/1.4964085)

8. I.A. Bedarev, O.S. Vankova, M.A. Goldfeld, V.M. Temerbekov, N.N. Fedorova, A.V. Fedorov, "Numerical simulation of combustion initiation in hydrogen-air mixture in supersonic flow with energy impact," AIP Conference Proceedings 1893, pp. № 030141, (2017). (DOI:10.1063/1.5007599)

9. A.V. Fedorov, N.N. Fedorova, O.S. Vankova, D.A. Tropin, "Verification of kinetic schemes of hydrogen ignition and combustion in air," AIP Conference Proceedings 1939, pp. 020019, (2018). (DOI:10.1063/1.5027331)

10. O.S. Vankova, Yu.V. Zakharova, N.N. Fedorova, and M.A. Goldfeld, "Influence of variable entry conditions on the structure and parameters of supersonic flow in the channel with sudden expansion," AIP Conference Proceedings 2027, pp. 040018 (2018). (DOI:10.1063/1.5065292)

11. N.N. Fedorova, O.S. Vankova, Yu.V. Zakharova, "Simulation of hydrogen mixing and supersonic combustion under condition of hot-shot aerodynamic facility," AIP Conference Proceedings 2125, pp. 030080 (2019). (DOI:10.1063/1.5117462)

12. Yu.V. Zakharova, N.N. Fedorova, M.A. Goldfeld and O. S. Vankova, Numerical simulation of transient mixing and ignition processes in a supersonic combustor chamber, J. Phys.: Conf. Ser. 1382, pp. 012055 (2019). (DOI:10.1088/1742-6596/1382/1/012055)

13. O.S. Vankova, N.N. Fedorova, Modelling of mixing and ignition of a cold hydrogen jet in a supersonic hot air flow, J. Phys.: Conf. Ser. 1404, pp. 012073 (2019). (DOI:10.1088/1742-6596/1404/1/012073)

14. O.S. Vankova, Comparison of turbulence/chemistry interaction models in the problem of ignition a parallel hydrogen jet in a supersonic air flow, AIP Conference Proceedings 2351, 040052 (2021). (DOI:10.1063/5.0053925)

Др. публикации (статья в сборнике трудов конференции; журнал, рецензируемый в РИНЦ и пр.):

15. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Математическое моделирование воспламенения водородно-воздушной смеси в каналах при сверхзвуковых скоростях потока, В сборнике: НАУКА. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ. ОБОРОНА. труды XVI Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию Победы Великой Отечественной войне. 2015. С. 175-178.

16. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Математическое моделирование воспламенения водородо-воздушной смеси в каналах при сверхзвуковых скоростях потока, В сборнике: Динамика Многофазных Сред. XIV Всероссийский семинар, приуроченный к 75-летию академика РАН Фомина В.М., Под редакцией В.М. Фомина, А.В. Федорова. 2015. С. 139-144.

17. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Гольдфельд М.А., Исследование управления процессами воспламенения и горения в сверхзвуковой камере сгорания с помощью объемной ионизации потока, В сборнике: Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016). Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016. С. 125-127.

18. O. S. Vankova, S. A. Valger, M. A. Goldfeld, Yu. V. Zakharova, and N. N. Fedorova, Simulation of mixing and ignition of hydrogen in channels at supersonic speeds, 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR'2016) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016), С. 206-207.

19. Zakharova Y.V., Fedorova N.N., Valger S.A., Goldfeld M.A., Vankova O., Numerical simulation of hydrogen jet injection and ignition in supersonic flow, ECCOMAS Congress 2016 - Proceedings of the 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. 7. 2016. С. 7237-7246.

20. О.С. Ванькова, Н.Н. Федорова, Верификация кинетических схем горения водородо-воздушной смеси в сверхзвуковом потоке, В сборнике: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СТРОИТЕЛЬСТВА. Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. 2016. С. 219-224.

21. Ванькова О.С., Бедарев И.А., Гольдфельд М.А., Темербеков В.М., Федорова Н.Н., Федоров А.В., Численное исследование стабилизации горения при искусственном воспламенении водородо-воздушной смеси в сверхзвуковом потоке, В книге: XXXIII Сибирский теплофизический семинар, посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых, Тезисы докладов. 2017. С. 132.

22. Ванькова О.С., Федоров А.В., Федорова Н.Н., Тропин Д.А., Верификация кинетических схем воспламенения и горения водорода в воздухе, В книге: Тезисы XV Всероссийского семинара "Динамика Многофазных Сред" с участием иностранных ученых. Под редакцией А.В. Федорова, В.М. Фомина. 2017. С. 143-147.

23. Ванькова О.С., Захарова Ю.В., Гольдфельд М.А., Федорова Н.Н., Численное моделирование сверхзвуковых течений в каналах с учетом нестационарных эффектов, В книге: Тезисы XV Всероссийского семинара "Динамика Многофазных Сред" с участием иностранных ученых. Под редакцией А.В. Федорова, В.М. Фомина. 2017. С. 21-22.

24. Ванькова О.С., Численное моделирование сверхзвукового течения в канале с учетом переменных входных условий, В книге: Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии. Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых. Под редакцией В.В. Козлова. 2018. С. 25-26.

25. Bedarev I.A., Vankova O.S., Goldfeld M.A., Temerbekov V.M., Fedorova N.N., Fedorov A.V., Numerical simulation of combustion initiation in hydrogen-air mixture in supersonic flow with energy impact, Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017). Dedicated to the 60th anniversary of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Electronic resource): AIP Conference Proceedings. Editors: Vasily Fomin. 2017. С. 030141.

26. Vankova O.S., Zakharova Yu.V., Fedorova N.N., Goldfeld M.A. Influence of variable entry conditions on the structure and parameters of supersonic flow in the channel with sudden expansion, XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13 - 19 Aug., 2018), pp. 283-284.

27. Ванькова О.С., Численное исследование влияния переменных входных условий на структуру и параметры сверхзвукового течения в канале с внезапным расширением, В книге: Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии. Тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых. Под редакцией В.В. Козлова. 2019. С. 32-33.

28. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Моделирование воспламенения струи водорода в канале при сверхзвуковой скорости потока: Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. - Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2019 (тезисы)

29. Захарова Ю.В., Федорова Н.Н., Гольдфельд М.А., Ванькова О.С., Численное моделирование смешения и горения в сверхзвуковом потоке при нестационарных входных параметрах, В книге: XXXV Сибирский теплофизический семинар, посвящённый 75-летию Профессора Терехова Виктора Ивановича. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых. Тезисы докладов. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. 2019. С. 75.

30. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Моделирование воспламенения и горения «холодного» водорода во «влажном» воздухе при сверхзвуковой скорости потока, В книге: Динамика многофазных сред. тезисы XVI Всероссийского семинара с международным участием. 2019. С. 27-29.

31. Ванькова О.С., Математическое моделирование нестационарных входных условий в канале камеры сгорания при сверхзвуковой скорости течения, В книге: Тезисы XX Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. 2019. С. 10-11

32. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Численное исследование влияния нестационарных входных условий на структуру и параметры сверхзвукового течения в канале камеры сгорания: Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции. - Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2020 (тезисы)

33. Vankova O.S., Comparison of turbulence/chemistry interaction models in the problem of ignition a parallel hydrogen jet in a supersonic air flow, XX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2020), pp. 207-208.

34. Ванькова О.С., Математическое моделирование нестационарных входных условий сверхзвукового потока и струи аргона в канале камеры сгорания, В книге: Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии. тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет. Новосибирск, 2020. С. 40-41.

35. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Смешение, воспламенение и горение круглой водородной струи во влажном воздухе при больших скоростях, В книге: Динамика многофазных сред (ДМС-2021). Тезисы докладов XVII Всероссийского семинара с международным участием. Новосибирск, 2021. С. 75.

36. Ванькова О.С., Федорова Н.Н., Численное исследование влияния внешних параметров на смешение, воспламенение и стабилизацию пламени в коаксиальной водородовоздушной струе, инжектируемой в затопленное пространство, В книге: Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии. тезисы докладов XVI

Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. 2022. С. 21-22.

Учитывая вышеизложенное, постановили:

Диссертация Ваньковой Ольги Сергеевны «Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения в предварительно неперемешанных водородно-воздушных потоках при сверхзвуковых скоростях» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Диссертация является законченной научной работой, содержащей новые результаты по актуальной теме. Опубликованные по теме диссертации научные работы отражают ее содержание.

Диссертация Ваньковой Ольги Сергеевны «Математическое моделирование воспламенения и стабилизации горения в предварительно неперемешанных водородно-воздушных потоках при сверхзвуковых скоростях» рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на заседании семинара «Теоретическая и прикладная механика» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

На заседании присутствовали: д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Шиплюк А.Н., д.т.н., Лебига В.А., д.т.н. Звегинцев В.И., д.ф.-м.н. Козлов В.В., д.ф.-м.н. Федорова Н.Н., д.ф.-м.н. Хмель Т.А., д.ф.-м.н. Гапонов С.А., д.ф.-м.н. Латыпов А.Ф., д.т.н. Запрягаев В.И., д.ф.-м.н. Киселев С.П., д.ф.-м.н. Литвиненко Ю.А., д.ф.-м.н. Фурсенко Р.В., д.т.н. Яковенко С.Н, к.ф.-м.н. Бедарев И.А., к.ф.-м.н. Лаврук С.А., к.ф.-м.н. Гимон Т.А., к.ф.-м.н. Большова Т.А., к.ф.-м.н. Кратова Ю.В., к.ф.-м.н. Серещенко Ю.В, к.ф.-м.н. Хотяновский Д.В. и другие, всего 20 сотрудников с учёной степенью. Результаты голосования: "за" – 20 чел., "против" – 0 чел., "воздержалось" – 0 чел., протокол № 82 от 24 мая 2022 г.

Зам. председателя семинара

Академик РАН

Секретарь семинара

к.ф.-м.н.



Т.А. Гимон