

На правах рукописи

ВАНЬКОВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ
И СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
НЕ ПЕРЕМЕШАННЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ ПОТОКАХ
ПРИ СВЕРХЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ**

Специальность 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Научный руководитель:

Федорова Наталья Николаевна, профессор, доктор физико-математических наук, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории № 12 «Волновые процессы в ультрадисперсных средах».

Официальные оппоненты:

Терехов Владимир Викторович, профессор РАН, доктор физико-математических наук, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, заведующий лабораторией № 2.2 «Термогазодинамика».

Большова Татьяна Анатольевна, кандидат физико-математических наук, Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения РАН, старший научный сотрудник лаборатории «Кинетики процессов горения».

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие “Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского”

Защита состоится «20» января 2023 г. в 9⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.1.125.01 (Д003.035.02) в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

http://www.itam.nsc.ru/website/inst/upload/infoblock/file/2iad3-Vankova_textdiss.pdf

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

С.А. Гапонов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ¹

Актуальность темы исследования

Турбулентное горение встречается во многих инженерных системах, таких как ракеты, двигатели внутреннего сгорания, авиационные двигатели, промышленные горелки, печи и другие устройства. Проблема инициирования воспламенения и устойчивого горения водорода в сверхзвуковых потоках является одной из ключевых задач внутренней аэродинамики. Высокоскоростные турбулентные течения в каналах характеризуются сложной волновой структурой, наличием областей отрыва пограничного слоя, которые оказывают влияние на процессы горения. При высоких числах Маха полета воздух, попадающий в камеру сгорания двигательной установки летательного аппарата, имеет высокую сверхзвуковую скорость. Большие скорости потока 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.

Изучение процессов турбулентного горения при высоких скоростях является важной фундаментальной задачей, имеющей прикладное значение с точки зрения повышения эффективности энергетических установок, снижения расхода топлива и образования загрязняющих веществ. Исследования процессов горения водорода с помощью различных методов активно ведутся в научно-исследовательских организациях различных стран, среди которых есть много российских, в том числе ИТПМ СО РАН, ИТ СО РАН, ИГ СО РАН, ИХКиГ СО РАН, ОИВТ РАН, ИХФ РАН, ЦАГИ, ЦНИИмаш, ЦИАМ, НИИ механики МГУ, МАИ, МВТУ им. Баумана. Большой вклад в изучение проблемы внесли научные коллективы, которые возглавляют Баев В.К., Третьяков П.К., Козлов В.В., Гольдфельд М.А., Звегинцев В.И., Терехов В.И., Голуб В.В., Левин В.А., Власенко В.В., Полежаев Ю.В., Суржиков С.Т., Колесников О.М., Фролов С.М., Копченков В.И., Баженова Т.В., Сабельников В.А., Копченков В.И., и другие ученые. Среди иностранных авторов отметим Drummond J.P., Ladeinde F., Hoste J.-J. O.E., DalBello T., Xiao X., Hassan H.A., Baurle R.A., Fureby C., Kong S.-C., Wang Z.G., Zhang Y.X. и др.

В наземных экспериментальных установках трудно реализовать параметры, соответствующие условиям реального полёта, что в совокупности с точностью доступных методов измерения и ограниченным временем эксперимента затрудняет исследования горения в сверхзвуковых потоках с помощью экспериментальных методов. Сложность процессов не позволяет применять теоретические методы решения задач для реальных пространственных конфигураций и многовариантных комбинаций условий потока и состава реагирующей смеси. Поэтому наряду с экспериментальными и теоретическими методами для исследования процессов горения в сверхзвуковых потоках широко используют математическое моделирование, которое после верификации на проверенных экспериментальных данных позволяет предсказать параметры воспламенения при

¹Работа поддержана грантами РФФИ 13-08-00786, 16-58-00052, 15-07-06581, 17-08-01158, 19-38-90125, 20-08-00959 и РНФ 16-19-00010.

различных условиях, проанализировать устойчивость процесса горения и оценить его полноту.

На характеристики пламени оказывают влияние многочисленные факторы, такие как волновая структура сверхзвукового течения, турбулентность, акустика, смешение, химическая кинетика, радиационный теплообмен, а также их взаимное влияние. Каждый из перечисленных факторов требует разработки специальных математических моделей, а успех численного моделирования процесса турбулентного горения в целом зависит от умелого сочетания различных моделей и методов, позволяющих в условиях ограниченных ресурсов решить поставленные задачи с достаточной точностью.

Целью исследования является разработка фундаментальных основ численного моделирования сверхзвуковых внутренних турбулентных реагирующих течений с учетом смешения и горения водородного топлива. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **основные задачи**:

1. Тестирование численных моделей нестационарных сверхзвуковых турбулентных течений с учетом массообмена и химических реакций.
2. Верификация кинетических механизмов горения водорода в воздухе и тестирование различных подходов моделирования взаимодействия турбулентности и химии.
3. Исследование влияния параметров внешней среды и состава воздушной струи на воспламенение и стабилизацию горения водородных струй, истекающих в затопленное пространство.
4. Исследование энергетического воздействия на процессы воспламенения водородно-воздушных смесей в канале при высоких числах Маха.
5. Численное исследование процессов воспламенения предварительно не перемешанной водородно-воздушной смеси и стабилизации пламени в каналах переменного сечения для условий экспериментов, проведенных в импульсной установке ИТ-302М ИТПМ СО РАН.

Объектом исследования являются сверхзвуковые турбулентные реагирующие течения газовых смесей. **Предметом исследования** являются процессы самовоспламенения и стабилизации горения предварительно не перемешанных водородно-воздушных смесей.

Методы исследования. Для описания турбулентного горения в сверхзвуковом потоке использован подход, основанный на решении нестационарных осреднённых по Фавру уравнений Навье – Стокса для многокомпонентной смеси, дополненных $k-\omega$ SST моделью турбулентности и блоком уравнений химической кинетики, в котором конечные скорости реакций вычисляются из закона Аррениуса. В работе использованы шесть кинетических механизмов горения водорода в воздухе, включая приведенные и детальные кинетические схемы. Для моделирования взаимодействия турбулентности и химии используется модель диссипации вихря (EDM). В качестве основного инструмента численного моделирования использован коммерческий конечно-объемный пакет Ansys Fluent.

Научная новизна

1. Пакет Ansys Fluent применен для решения нестационарных задач горения в предварительно не перемешанных высокоскоростных водородно-воздушных потоках. 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.
2. 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 сверхзвуковых скоростях потока. Впервые в расчете получены все наблюдающиеся в эксперименте стадии нестационарного горения, а также режим с выходом волны горения в зону инжекции («тепловое запираание канала»).

На защиту выносятся результаты численного моделирования 2D и 3D турбулентных течений предварительно не перемешанных 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 водородно-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, приводящего к переходу к дозвуковому режиму горения.

Практическая значимость работы. Научные выводы работы могут использоваться в учебном процессе при чтении спецкурсов для студентов старших курсов и аспирантов.

Достоверность 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.

Апробация результатов исследования. Полученные результаты представлялись и обсуждались на семинарах под руководством академика РАН Фомина В.М., профессора Федорова А.В., к.ф.-м.н. Бедарева И.А. (ИТПМ СО РАН), профессора Черемисина А.А. (ИХКиГ СО РАН), проф. В.И. Терехова (ИТ СО РАН), объединенном семинаре по аэромеханике (ИТПМ СО РАН,

ЦАГИ, НИИ Механики МГУ, СПбГУ), а так же на XIV, XV, XVI и XVII Всероссийском семинаре «Динамика Многофазных Сред» (Новосибирск, 2015, 2017, 2019 и 2021 гг.), Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск – Шерегеш, 2018, 2019, 2020 и 2022 гг.), XXXIII и XXXVIII Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2017 и 2021 гг.), 7 Европейском конгрессе по вычислительным методам в прикладной науках и инженерии (ECOMMAS, 2016), XVIII, XIX, XX и XXI Международных конференциях по методам аэрофизических исследований ISMAR (2016, 2018 и 2020 гг.)

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 водородно-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 запираанием канала.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследования получены автором лично. По теме исследования опубликовано 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.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 182 страницах, включает 15 таблиц, 86 рисунков и схем.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и дан 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 существенных 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. Использованы 6 кинетических механизмов горения водорода, включающих две приведенные^{2,3} и 4 детальные

² ANSYS CFD Academic Research, Custom number 610336.

³ Tropin D., Bedarev I. // J. Loss Prev. Process. Ind. 2021. Vol. 72, Art. 104595. 10 p.

кинетические схемы (16^4 , 37^5 , 38^6 и 50^4 реакций). Для моделирования взаимодействия турбулентности и химии использована модель диссипации вихря (EDM)⁷.

Далее описаны подходы и методы приближенного решения дифференциальных уравнений. С помощью метода конечных объемов, который лежит в основе используемого в работе программного комплекса Ansys Fluent², 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.

Вторая глава посвящена верификации математической модели, расчетного алгоритма и кинетических механизмов. Для тестирования выбраны эксперименты J.S. Evans et al. (1978)⁸; M. Burrows – A. Kurkov (1971)⁹; Cohen – Guile (1969)¹⁰, в которых исследовано горение предварительно не перемешанных водородно-воздушных смесей. Геометрия и основные параметры экспериментов представлены в таблице 1. Здесь M – число Маха, P – давление, T – температура, Y – массовая концентрация компонентов, ϕ – коэффициент избытка водорода.

В 2.1 представлены результаты тестирования нескольких кинетических схем горения водорода по времени задержки воспламенения. Расчеты проведены в одномерной невязкой постановке, которая описывает распространение ударной волны в канале с закрытым концом, заполненном подготовленной смесью водорода, кислорода и инертного газа (аргона/азота). После отражения ударной волны от торца канала смесь имеет нулевую скорость, что позволяет свести дифференциальную задачу к алгебраической, решение которой найдено с помощью программы, разработанной в лаборатории №12 ИТПМ СО РАН¹¹. За отраженной волной реализуются условия, благоприятные для самовоспламенения. Время задержки воспламенения определялось по максимуму скорости изменения концентрации радикала OH. Проведено сравнение времен задержки воспламенения с данными экспериментов Schott G.L., Kinsey J.L. (1958); Cheng R.K. (1984); Blumenthal R. (1996); Bhaskaran K.A., Gupta M.C. (1973); Slack M., Grillo A. (1977).

⁴ Ladeinde F., A Critical Review of Scramjet Combustion Simulation: AIAA Paper. 2009. Art. 2009-127, 13 p.

⁵ Maas U., Warnatz J. // Combustion and Flame. 1988. Vol. 74. P. 53-69.

⁶ Tien J. H., Stalker R. J. // Combustion and Flame. 2002. Vol. 130. P. 329–348.

⁷ Magnussen B. F., Hjertager B. H. // Symposium Comb. 1976. Vol. 16. No. 1. P. 719-729.

⁸ John S. Evans, C. J. Schexnayder Jr., Application of a two-dimensional parabolic computer program to prediction of turbulent reacting flows: NASA Technical Paper 1169. 60 p. 1978.

⁹ Burrows M.C., Kurkov A.P., Analytical and experimental study of supersonic combustion of hydrogen in a vitiated airstream: NASA TM X-2828. 1973.

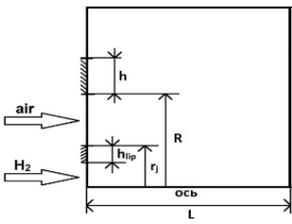
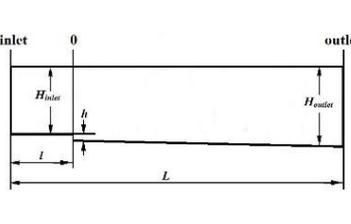
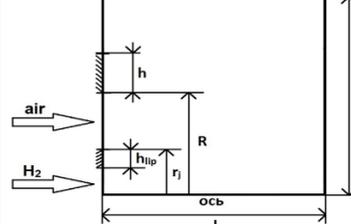
¹⁰ Cohen L.S., Guile R.N. Investigation of the mixing and combustion of turbulent compressible free jets: CR-1473, NASA. 1969.

¹¹ Бедарев И.А., Рылова К.В., Федоров А.В. // ФГВ. 2015. Т. 51. N 5. С. 22-33.

Расчеты показали, 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.

Таблица 1

Параметры тестовых конфигураций

Эксперимент	Evans et al ⁸ , 1978	Burrows – Kurkov ⁹ , 1971	Cohen – Guile ¹⁰ , 1969
Геометрия	2D осесимметричная	2D плоская	2D осесимметричная
Схема расчетной области			
Размеры, см	$r_j = 0,47625$, $R = 3,1265$, $h_{lip} = 0.15$, $h = 5$, $L = 100$, $H = 60$	$H_{inlet} = 8.9$, $H_{outlet} = 10.48$, $h = 0.476$, $h_j = 0.076$, $L = 40.6$, $l = 5$	$r_j = 1$, $R = 5$, $h_{lip} = 0.054$, $h = 5$, $L = 150$, $H = 80$
Водородная струя	$M = 2$, $P_{st} = 0.1$ МПа, $T_{st} = 251$ К, $Y_{H_2} = 1$	$M = 1$, $P_{st} = 0.1$ МПа, $T_{st} = 254$ К, $Y_{H_2} = 1$	$M = 1.46$, $P_{st} = 0.09$ МПа, $T_{st} = 276$ К, $Y_{H_2} = 1$
Влажный воздух	$M = 1.9$, $P_{st} = 0.1$ МПа, $T_{st} = 1495$ К, $Y_{O_2} = 0.241$, $Y_{H_2O} = 0.281$, $Y_{N_2} = 0.478$	$M = 2.44$, $P_{st} = 0.1$ МПа, $T_{st} = 1270$ К, $Y_{O_2} = 0.258$, $Y_{H_2O} = 0.256$, $Y_{N_2} = 0.486$	$M = 1.86$, $P_{st} = 0.09$ МПа, $T_{st} = 1140$ К, $Y_{O_2} = 0.26$, $Y_{H_2O} = 0.15$, $Y_{N_2} = 0.59$
ϕ	0.223	0.371	0.556

В 2.2 представлены результаты численных исследований течений для условий экспериментальных данных⁸ (см. табл. 1). В расчетах использовалась структурированная сетка, содержащая около 10^5 ячеек, которая имела сгущение в области среза сопла и оси струи. Сравнение результатов расчета с экспериментом выполнено по следующим параметрам: давление Пито, полная температура и массовые концентрации компонент смеси. На рис. 1 представлено сравнение расчетных и экспериментальных профилей массовой концентрации паров воды в сечениях поперек струи. Рисунок показывает, что лучшее согласование профилей получено в расчете с кинетической схемой⁵, включающей 37 реакций.

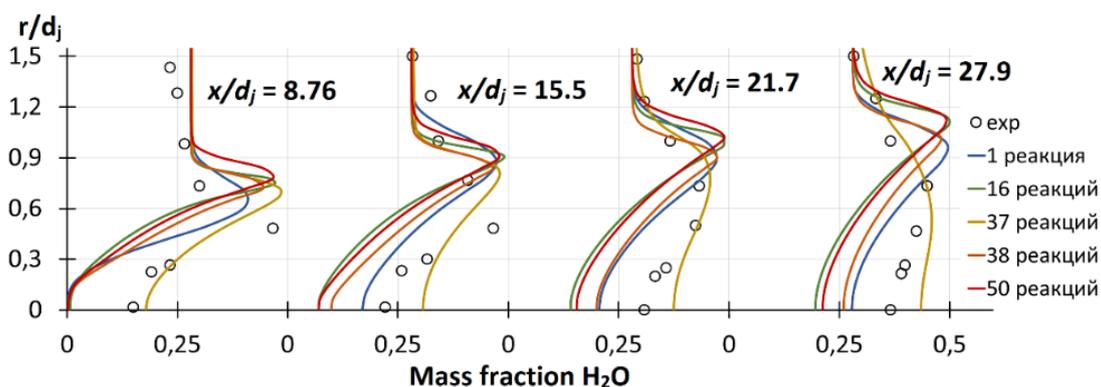


Рис. 1. Расчетные и экспериментальные⁸ профили массовой концентрации H₂O

В 2.3 представлены результаты расчетов воспламенения плоской пристенной струи холодного водорода в потоке горячего влажного воздуха для условий экспериментов⁹ (см. табл. 1).

Расчет проведен в нестационарной постановке с использованием решателя, основанного на давлении. Использовалась структурированная сетка со сгущением к стенкам канала. Задача без учета химических реакций («холодное» течение) была рассчитана на последовательности сеток. Расчеты позволили достаточно точно предсказать параметры течения и получить хорошее совпадение с экспериментальными данными по концентрации химических компонентов в выходном сечении канала.

Расчеты реагирующего течения проведены с несколькими кинетическими схемами, а также с моделью EDM. На рис. 2 представлены поля течений мгновенных и средних по времени величин массовой концентрации H_2O , полученных в расчете с кинетической схемой⁵. На мгновенных картинах видны интенсивные вихри, формирующиеся на верхней границе слоя горения, которые существенно влияют на смешение и характеристики реагирующего течения.

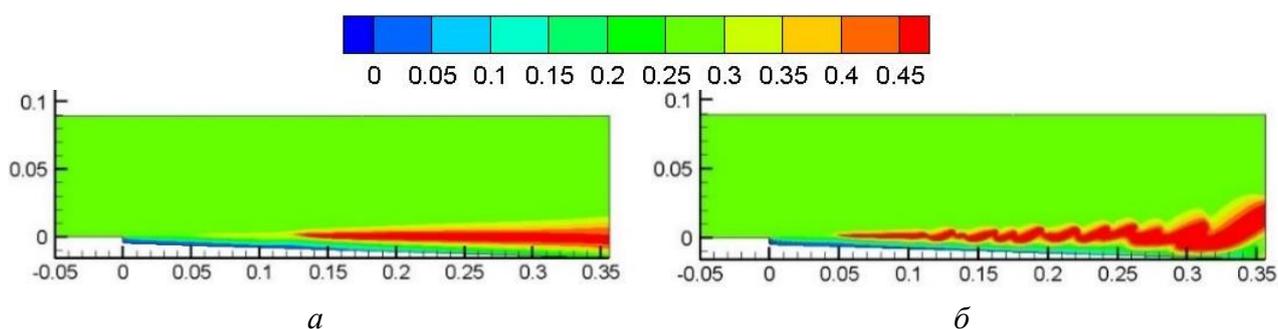


Рис. 2. Поля средней по времени (*a*) и мгновенной (*б*) массовой концентрации H_2O , полученные в расчете с кинетической схемой 37 реакций

На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных и расчетных профилей средней мольной концентрации H_2 (*a*), H_2O (*б*) на выходе из канала. Кинетическая схема⁵ (C5) дает лучшее согласие с экспериментальными данными по всем параметрам, как вблизи оси, так и по всей ширине слоя горения. Модель EDM и кинетические схемы C1-C4 занижают максимум концентрации паров воды и предсказывают более широкий по сравнению с экспериментом слой горения. Учет нестационарности в комбинации с детальной кинетической схемой⁵ позволяет получить хорошее совпадение средних характеристик течения с экспериментальными данными о распределении давления, температур, чисел Маха и концентраций компонентов на выходе из канала.

В 2.4 представлены результаты численного исследования воспламенения круглой холодной сверхзвуковой водородной струи, окруженной кольцевой сверхзвуковой струей горячего влажного воздуха/азота, при истечении в затопленное пространство для условий эксперимента¹⁰ (см. табл. 1). Для моделирования использован подход, основанный на конечных скоростях реакций (FRC) дополненный кинетической схемой⁵, и модель EDM.

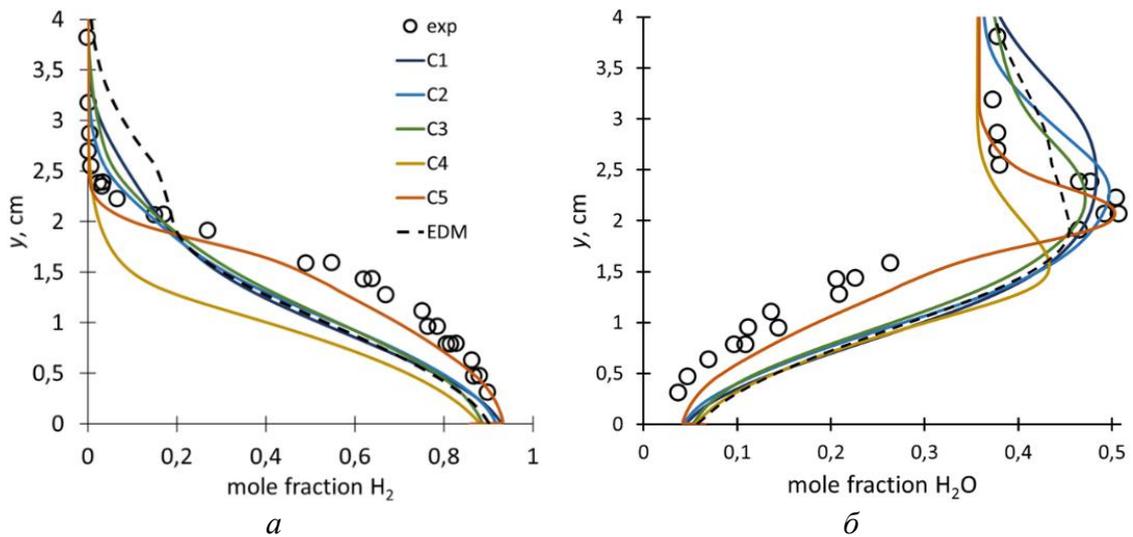


Рис. 3. Экспериментальные (символы) и расчетные (линии) профили мольных долей H_2 (а) и H_2O (б) на выходе из канала

На рис. 4 представлено сравнение экспериментальных и расчетных профилей давления Пито (а) и массовых концентраций H_2 и H_2O (б) в сечениях поперек потока для случая «холодного» течения (массовая доля кислорода во внешней струе 6%) и «горячего» течения. Рисунок 4 показывает, что экспериментальные и расчетные профили находятся в хорошем качественном и количественном согласовании.

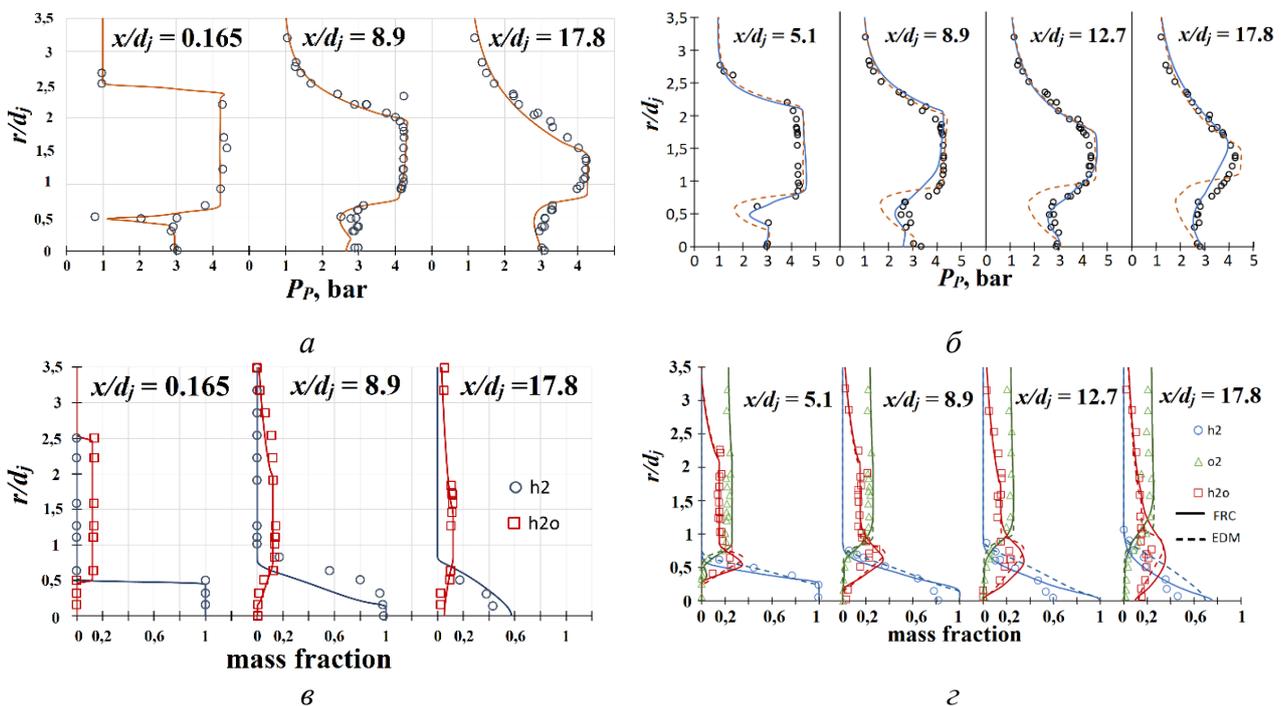


Рис. 4. Сравнение экспериментальных (символы) и расчетных (линии) профилей давления Пито (а, б) и массовых концентраций компонент (в, з) для «холодного» (а, в) и «горячего» (б, з) течений

Таким образом, проведенное в главе 2 сравнение различных подходов моделирования горения водородно-воздушных смесей показало, что лучшее совпадение с экспериментом дает подход, основанный на конечной скорости реакции с использованием детального кинетического механизма⁵, 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 химии с использованием EDM не приводит к улучшению предсказания параметров течений и концентраций компонентов смеси.

В третьей главе представлены параметрические исследования влияния внешних параметров на смешение, воспламенения и горения предварительно не перемешанных водородно-воздушных смесей.

В 3.1 представлены результаты параметрических исследований влияния параметров в затопленном пространстве на горение водородной струи.

В качестве базовых выбраны геометрия и условия эксперимента¹⁰ (см. табл. 1). Рассмотрены три случая, которые соответствуют различной высоте h над уровнем земли (табл. 2). С ростом h падает давление, температура и растет нерасчетность струй n_p .

Таблица 2

Параметры затопленного пространства

Расчетный случай	h , км	P_∞ , атм	T_∞ , К	n_p
case 1	0	1.01	288.15	0.9
case 2	5	0.54	255.65	1.67
case 3	10	0.26	223.15	3.4

На рис. 5 представлены расчетные профили числа Маха на оси (a) и графики полноты сгорания водорода (b) для случаев из табл. 2. Здесь

$$\eta_c(x) = 1 - \dot{m}_{H_2}(x) / \dot{m}_{H_2}|_{inlet},$$

\dot{m}_{H_2} – массовый расход водорода через поперечное сечение канала.

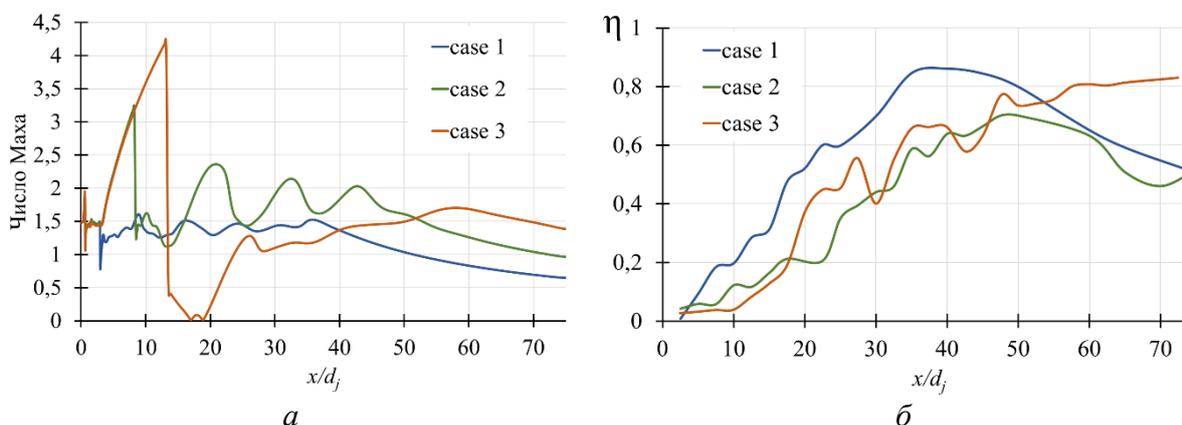


Рис. 5. Профили числа Маха на оси струи (a) и полнота сгорания водорода (b) для случаев 1–3 (табл. 2)

Графики показывают, что с ростом n_p скачки, приходящие на ось внутренней струи, становятся более интенсивными. Для case 3 на участке $x/d_j = 10 - 20$ образуется прямой скачок, за которым формируется дозвуковая область, способствующая воспламенению и стабильному горению. На начальном участке струи ($x/d_j < 40$) полнота сгорания при $n_p = 0.9$ выше, чем в других случаях. На дальнем участке самая высокая полнота сгорания получена при $n_p = 3.4$, что объясняется

воздействием прямого скачка (диска Маха), сформировавшегося внутри недо-расширенной струи.

В 3.2 представлены параметрические исследования влияния массовой концентрации паров воды в струе воздуха на воспламенение и стабилизацию горения. В качестве базовых использованы геометрия и условия эксперимента¹⁰ (см. табл. 1). В табл. 3 представлены массовые концентрации компонентов смеси в струе влажного воздуха.

Таблица 3
Массовые концентрации компонентов
в струе воздуха

Расчетный случай	O ₂	H ₂ O	N ₂
case 1	0.26	0	0.74
case 2	0.26	0.10	0.64
case 3	0.26	0.15	0.59
case 4	0.26	0.20	0.54

Расчеты проведены в нестационарной постановке. Для всех случаев построены мгновенные поля концентраций OH и H₂O в различные моменты времени. Выполнена оценка средних и пульсационных составляющих основных физических величин и концентраций компонентов, которая показала сильное влияние концентраций водяных паров на процесс воспламенения и стабилизации пламени. Проведенные исследования показали, что процессом воспламенения смеси и стабилизацией пламени можно управлять, изменяя концентрации содержания паров воды во внешней воздушной струе. Оптимальные значения массовой концентрации лежат в диапазоне 10 – 15 %. Дальнейшее увеличение концентрации водяных паров приводит к увеличению толщины слоя горения и снижению массовой концентрации H₂O в горящей струе, что связано со смещением зоны стабилизации пламени от среза сопла.

В 3.3 представлены расчетные исследования сверхзвуковых течений в плоских каналах разной геометрии под воздействием электронного пучка. На входе в канал подается предварительно подготовленная стехиометрическая водородно-воздушная смесь при числе Маха $M = 4$. Расчеты течения в канале с уступом и предварительным поджатию выполнены для условий эксперимента¹² $P_{st} = 5,3$ кПа, $T_{st} = 220$ К.

Предварительный расчет без учета энергетического воздействия показал, что из-за низкой статической температуры потока смесь не воспламенялась. Далее на часть канала за уступом воздействует электронный пучок, что моделируется путем мгновенного перевода всех молекул в атомарное состояние. Энергетическое воздействие воспламеняет смесь, после чего пламя распространяется по всей высоте канала. Однако в дальнейшем высокоскоростной поток выносит пламя из канала, и горение наблюдается только вдоль стенок, что согласуется с данными эксперимента¹².

Далее численно изучено энергетическое воздействие на течения в каналах со стабилизаторами пламени в виде уступов и каверны при входных условиях $P_{st} = 50$ кПа, $T_{st} = 450$ К. Несмотря на более высокую температуру, уступ не

¹² Гольдфельд М.А., Кацнельсон С.С., Поздняков Г.А. Применение сильноточного широко-апертурного электронного пучка для инициирования горения в сверхзвуковом потоке // Тр. конф. «Горение топлив: теория, эксперимент, приложения». Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2015.

позволяет стабилизировать пламя в канале. Для канала с каверной пламя стабилизируется внутри каверны и вдоль стенок канала ниже по течению. Это подтверждает рис. 6, на котором представлены поля статической температуры на разные моменты времени. На верхней стенке горение инициирует слабая ударная волна, формирующаяся на передней кромке каверны вследствие утолщения слоя смешения над горящей каверной.

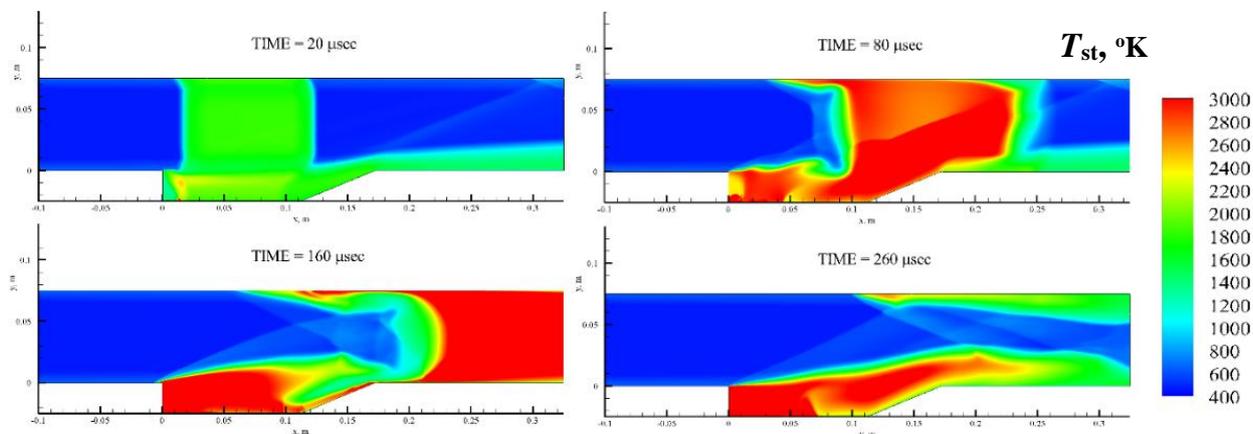


Рис. 6. Поля статической температуры на различные моменты времени в задаче об энергетическом воздействии

Четвертая глава содержит 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. На рис. 7, *а* представлена схема экспериментального канала, состоящего из форкамеры 1, плоского профилированного сопла 2, изолятора 3, секции постоянного сечения 4 и расширяющейся секции 5. На верхней и нижней стенках секции постоянного сечения расположены уступы высотой $h = 25$ мм. Водород подавался под углом 45 и 90 градусов через 8 круглых отверстий диаметром 2,8 мм, расположенных на верхней и нижней стенках канала на расстоянии 8,5 и 13,5 мм от кромки уступа. Расчетная область (рис. 9, *б*), построенная с учетом симметрии канала в вертикальном и поперечном направлениях, не включает сопло и изоляторную секцию и начинается в сечении 6. В расчетах использована многоблочная структурированная сетка со сгущением к стенкам.

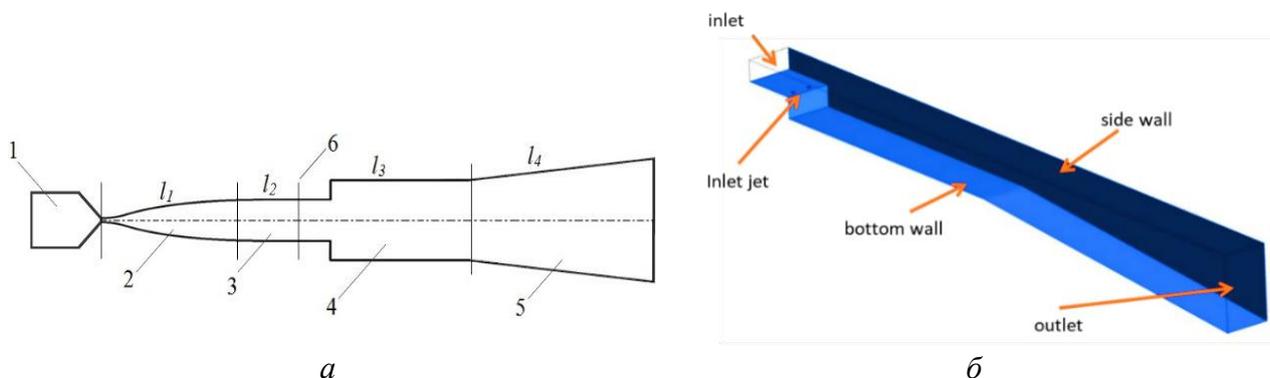


Рис. 7. Схема экспериментального канала (*а*) и расчетная 3D область (*б*)

На входе в расчетную область заданы статическое давление и профили статической температуры, числа Маха и турбулентных параметров, учитывающие пограничный слой толщиной 10 мм. На стенках канала заданы условия прилипания для скорости и соответствующее экспериментам условие «холодной» стенки $T_w = 300$ К.

Для случая «холодного» течения (без учета химических реакций) проведено исследование сходимости по сетке, для чего исходная сетка измельчалась вблизи стенки и в областях высоких градиентов плотности до получения сеточно-независимого решения. Сравнение результатов по распределению давления на стенках, полученных на средней и мелкой сетках, показало совпадение с точностью 1%. Адаптированная сетка, используемая в вычислениях «горячих» течений, состояла примерно из 8 миллионов ячеек и обеспечивала разрешение ламинарного подслоя ($y^+ = 2 \div 5$).

В 4.1 представлены результаты расчетов «холодных» течений для условий установки ИТ-302М, особенностью которой является то, что в ходе эксперимента давление и температура основного потока снижаются, а число Маха остаётся постоянным. Разработан алгоритм задания нестационарных условий на входе в канал, который реализован в двумерной и трехмерной постановках и верифицирован на экспериментальных данных.

На рис. 8 представлено сравнение экспериментальных (точки) и расчетных (линии) распределений безразмерного статического давления на стенках канала на моменты времени $t = 10, 20, 30, 40, 50$ и 60 мс для случая без инъекции струй. На рис. 9 показаны поля статического давления на разные моменты времени. Анализ полученных результатов показал, что несмотря на то, что параметры на входе в канал изменяются со временем, структура течения и безразмерные профили давления остаются неизменными. Это позволяет реализовать расчеты нестационарных реагирующих течений как последовательность задач со стационарными условиями. В качестве начальных данных для следующего момента времени выбирается решение, полученное на предыдущем шаге.

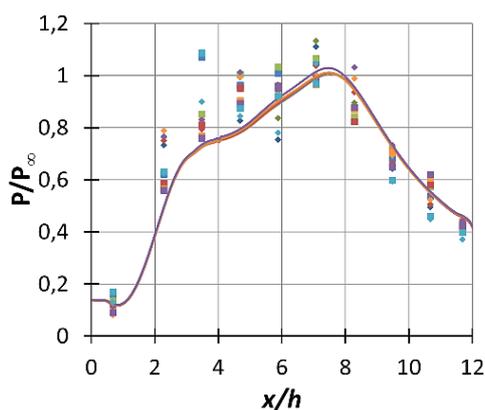


Рис. 8. Распределения безразмерного статического давления на стенках канала

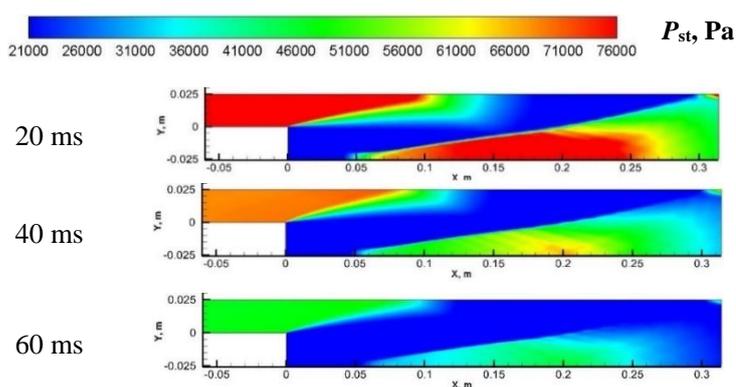


Рис. 9. Расчетные поля статического давления на разные моменты времени для случая без инъекции струй в плоскости симметрии

Далее в 3D постановке были проведены расчеты «холодных» течений для моделирования смещения воздуха и струй водорода, подаваемых в канал под углами $\alpha = 45^\circ$ и 90° . Параметры течений показаны в таблице 4, где J – относительный динамический напор струи.

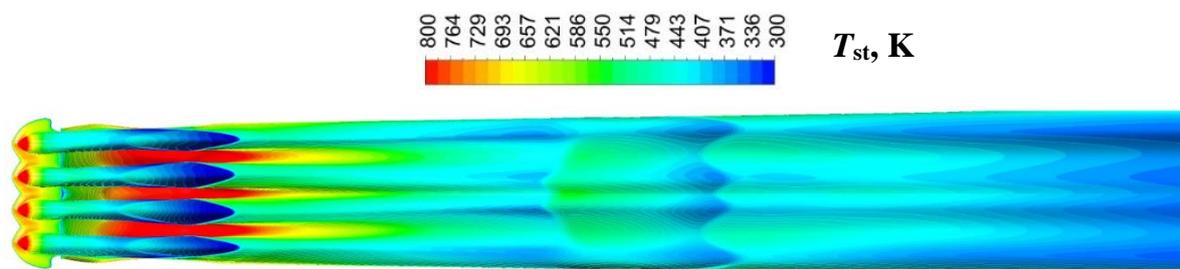
Таблица 4

Параметры «холодных» течений

case	$T_{0\infty}$, К	$P_{0\infty}$, МПа	α_{jet}	T_{0jet} , К	P_{0jet} , МПа	J
no jet	2100	0.11	-	-	-	-
Mix 1	2100	0.11	45°	300	2.8	1.73
Mix 2	1725	0.062	90°	300	5.39	2.46
Mix 3	1576	0.056	90°	300	4.22	2.66

Полученные результаты позволили проанализировать структуру трехмерных течений в канале с инжекцией водородных струй и определить зоны, в которых может произойти воспламенение.

Рисунок 10, на котором показаны поля статической температуры на изоповерхности стехиометрии, позволяет заключить, что благоприятные для воспламенения зоны расположены между струями в зоне формирования скачка, замыкающего отрывную область за уступом, и в месте прихода скачка с противоположенной стенки.

Рис. 10. Поле статической температуры на изоповерхности $Y_{H_2} = 4\%$

В 4.2 представлены результаты расчетов течений с инжекцией водорода под углом 45 градусов, в которых реализовано самовоспламенение водородно-воздушной смеси со стабилизацией пламени в зоне за уступом.

Численное моделирование выполнено в нестационарной постановке при постоянных входных условиях, соответствующих различным моментам времени эксперимента. На рис. 11 представлены поля статического давления для трех рассчитанных случаев (см. табл. 5).

Таблица 5

Входные условия для течения с 45°-инжекцией

case	$T_{0\infty}$, К	$P_{0\infty}$, МПа	T_{0jet} , К	P_{0jet} , МПа	J	φ
1	0,11	2100	300	2,8	1,73	1,2
2	0,08	1900	300	1,8	1,52	0,82
3	0,045	1700	300	1	1,5	0,8

Рисунки воспроизводят наблюдаемые в эксперименте¹³ стадии горения: локальное воспламенение (*a*), распространение пламени (*b*) и интенсивное горение (*в*). На первой стадии горения (рис. 11, *a*) зоны повышенного давления находятся вблизи стенок за замыкающим скачком, а также в конце секции постоянного течения. Повышение давления свидетельствует от том, что там произошло воспламенение. В последующие моменты времени (рис. 11, *b*) две зоны горения объединяются в одну, при этом относительное давление в канале повышается

¹³ Гольдфельд М.А. // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 4. С. 601-613.

примерно в два раза. Заключительная стадия горения (рис. 11, в) характеризуется формированием зоны высокого давления $P/P_\infty \approx 3$ в конце секции постоянного сечения, что свидетельствует об интенсивном горении.

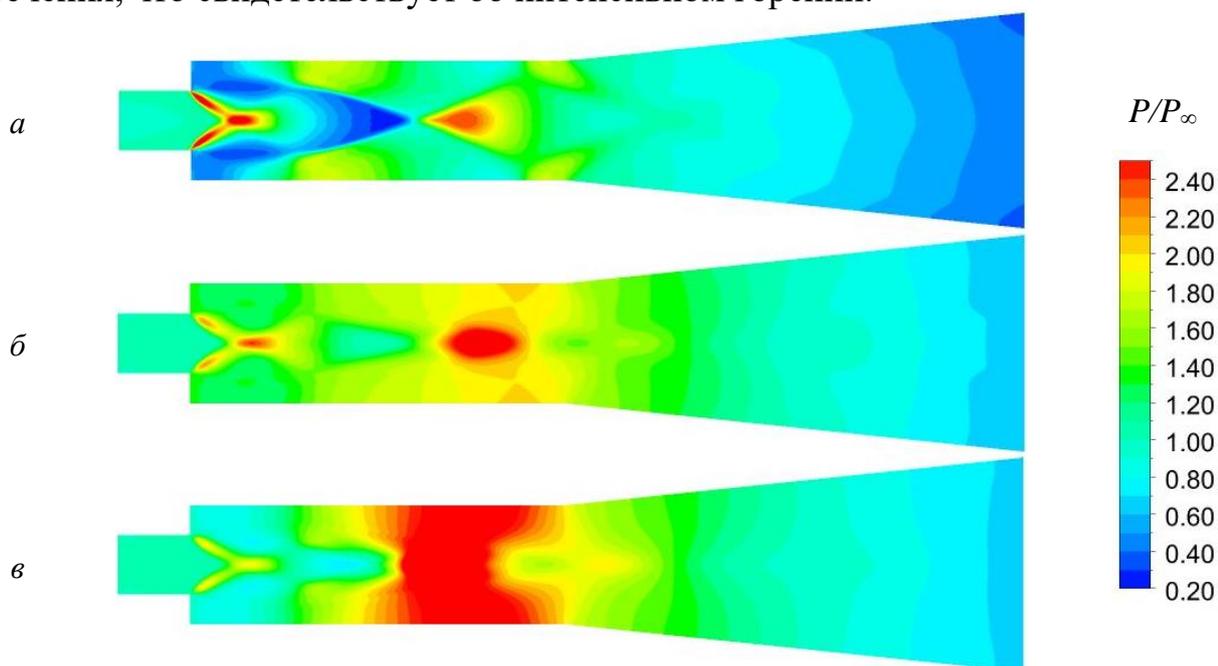


Рисунок 11. Расчетные поля безразмерного давления для случаев 1-3 (табл. 5)

Графики распределений безразмерного статического давления на стенке канала для нереагирующих и реагирующих случаев из табл. 4 и 5 (рис. 12, а) показывают, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются. Рис. 12, б показывает, что полнота сгорания быстро растет в конце секции постоянного сечения канала и увеличивается со временем по мере распространения пламени вверх и вниз по потоку. Несмотря на то, что $\varphi < 1$, водород полностью не сгорает. Это означает, что скорость реакций ограничивается смешением воздуха и водорода. При достижении стационарного режима горения величина коэффициента полноты сгорания составляет 0,72 – 0,76, что является достаточно хорошим результатом для высокоскоростного потока.

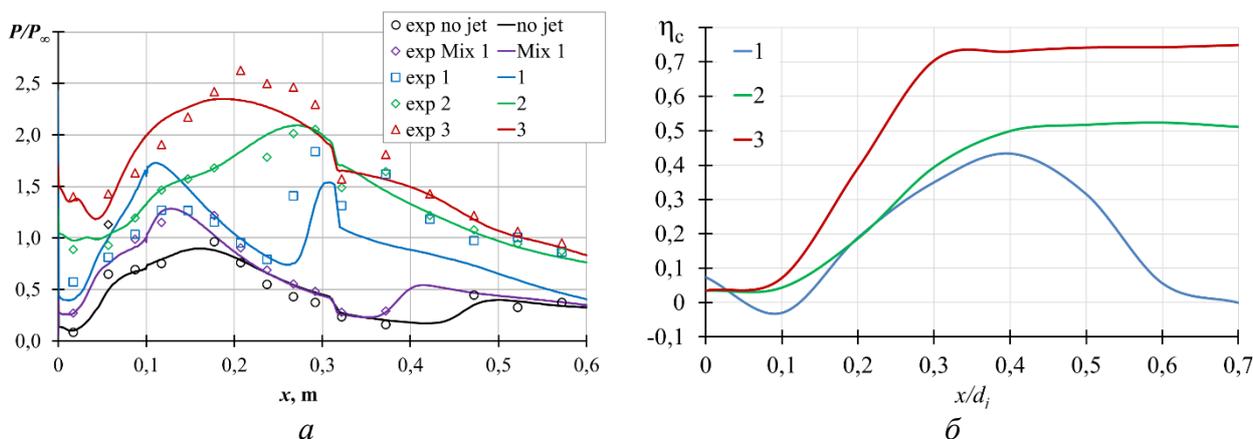


Рис. 12. Безразмерное статическое давление (а) и полнота сгорания (б) для различных расчетных случаев

Раздел 4.3 содержит результаты нестационарных расчетов для условий эксперимента¹³ с углом подачи водородных струй 90 градусов, в котором реализовано тепловое запираание канала (табл. 6).

Таблица 6

Входные условия для реагирующего течения с 90°-инжекцией

случай	$T_{0\infty}$, К	$P_{0\infty}$, МПа	T_{0jet} , К	P_{0jet} , МПа	J	φ
1	1725	0.062	300	5.39	2.46	0,82
2	1576	0.056	300	4.22	2.66	0,91

На рис. 13 представлены графики средней по поперечным сечениям канала расчетной массовой концентрации H_2O на разные моменты времени. При $t = 1$ мс максимумы H_2O находятся в отрывной зоне за уступом и в начале расширяющейся секции ($x = 0.4$ м). Затем волна горения усиливается и продвигается в сторону секции инъекции, о чем свидетельствует изменение положения максимума массовой концентрации H_2O . При $t = 1.8$ мс наблюдается интенсивное горение по всему каналу с небольшим снижением в расширяющейся секции канала.

На рис. 14 представлен график распределения мгновенных распределений статического давления на стенке канала. Связанный с фронтом горения скачок уплотнения при $t = 1$ мс находится в конце секции постоянного сечения ($x = 0.3$ м). В следующие моменты времени интенсивность ударной волны быстро растет и фронт волны движется вверх по потоку вплоть до зоны инъекции. Максимальные значения давления превышают входные значения в 4 - 6 раз, что согласуется с полученными в эксперименте данными.

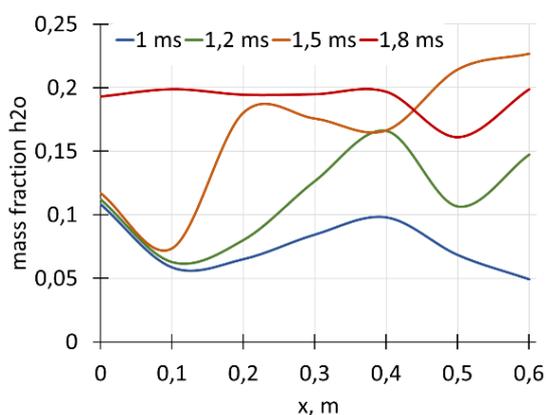


Рис. 13. Средняя по сечениям канала массовая концентрация H_2O

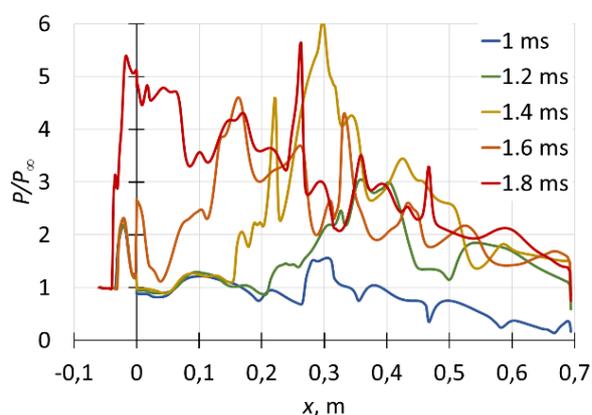


Рис. 14. Мгновенные распределения статического давления на стенке канала

На рис. 15 показано поле статической температуры в момент теплового запираания канала, на которой белым цветом показана звуковая линия. Активное горение с максимальной статической температурой 3000 К наблюдается в секции постоянного сечения канала. Дозвуковые зоны в центре канала объединяются с толстыми дозвуковыми зонами у стенок, формируя тепловое «горло». Затем виртуальное «сопло», образованное звуковой линией, расширяется, и поток ускоряется. Аналогичная волновая структура в виде сужающегося «горла» образуется в секции инъекции. Толстые дозвуковые зоны, которые смыкаются в центре, перекрывают сечение канала, что приводит к снижению массового расхода воздуха через входное сечение. При этих условиях расчет с заданным на входе

статическим давлением должен быть остановлен. В экспериментах аналогичная ситуация приводит к выходу ударной волны из изолятора или даже за пределы воздухозаборника, что означает прекращение штатного режима работы двигательной установки.

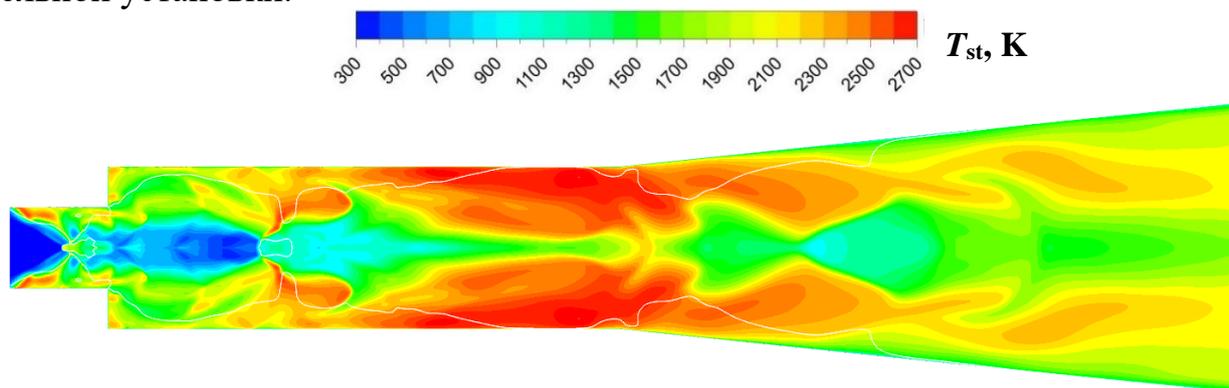


Рис. 15. Расчетное поле статической температуры и звуковая линия на момент теплового запираания канала

В заключении изложены выводы и основные результаты.

1. Проведено тестирование различных подходов к моделированию взаимодействия турбулентности и горения. В расчетах показано, что лучшее совпадение с экспериментом дает кинетическая схема⁵, включающая 37 реакций. На процесс воспламенения и интенсификации горения существенно влияет волновая структура течения в канале, а также нестационарные вихри, формирующиеся на внешней границе слоя горения. Поскольку во всех рассмотренных задачах, горение осуществляется по смешанному диффузионно-кинетическому механизму, использование модели EDM не приводит к улучшению предсказания параметров течений и концентраций компонент.
2. 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.
3. Численное исследование процессов воспламенения водородно-воздушной смеси в каналах с уступом для условий экспериментов, проведенных в импульсной установке ИТ-302 ИТПМ СО РАН, показало хорошее согласование с экспериментальными данными. Показано, что в зависимости от входных условий наблюдается стабилизация горения или развивается тепловое запираание 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.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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 // ФГВ. 2021. Т. 57. №4. С. 18-28. DOI: 10.15372/FGV20210402
3. Ванькова О.С., Федорова Н.Н. Воспламенение холодной водородной струи в спутной коаксиальной струе горячего влажного воздуха при истечении в затопленное пространство // ТиА. 2021. Т. 28. №6. С. 935-950.
4. Федорова Н.Н., **Ванькова О.С.**, Гольдфельд М.А. Нестационарные режимы воспламенения и стабилизации горения водорода в канале // ФГВ. 2022. Т. 58. №2. С. 3-11. DOI: 10.15372/FGV20220201
5. Федорова Н.Н., **Ванькова О.С.** Влияние параметров внешней среды на воспламенение и горение сверхзвуковой водородной струи, истекающей в затопленное пространство // ФГВ. 2022. Т. 58. №3. С. 19-31. DOI: 10.15372/FGV20220302

В других изданиях:

6. Zakharova Y.V., Fedorova N.N., Valger S.A., Goldfeld M.A., **Vankova O.S.**, 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 p., (2016). DOI: 10.7712/100016.2329.11006
7. **Vankova O.S.**, Valger S.A., Goldfeld M.A., Zakharova Y.V., Fedorova N.N. Simulation of mixing and ignition of hydrogen in channels at supersonic speeds // AIP Conf. Proceed. 2016. Vol. 1770. Art. 040016. 8 p. DOI: 10.1063/1.4964085
8. 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 // AIP Conf. Proceed. 2017. Vol. 1893. Art. 030141. 7 p. DOI: 10.1063/1.5007599
9. Fedorov A.V., Fedorova N.N., **Vankova O.S.**, Tropin D.A. Verification of kinetic schemes of hydrogen ignition and combustion in air, AIP Conf. Proceed. 2018. Vol. 1939. Art. 020019. 8 p. DOI: 10.1063/1.5027331
10. **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 // AIP Conf. Proceed. 2018. Vol. 2027. Art. 040018. 8 p. DOI: 10.1063/1.5065292
11. Fedorova N.N., **Vankova O.S.**, Zakharova Yu.V. Simulation of hydrogen mixing and supersonic combustion under condition of hot-shot aerodynamic facility // AIP Conf. Proceed. 2019. Vol. 2125. Art. 030080. 10 p. DOI: 10.1063/1.5117462
12. Zakharova Yu.V., Fedorova N.N., Goldfeld M.A., **Vankova O.S.** Numerical simulation of transient mixing and ignition processes in a supersonic combustor chamber // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1382. Art. 012055. 8 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012055
13. **Vankova O.S.**, Fedorova N.N. Modelling of ignition and combustion of cold hydrogen in vitiated air with supersonic flow speed // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1404. Art. 012073. 9 p. DOI: 10.1134/S001050822104002X
14. **Vankova O.S.** Comparison of turbulence/chemistry interaction models in the problem of ignition a parallel hydrogen jet in a supersonic air flow // AIP Conf. Proceed. 2021. Vol. 2351. Art. 040052. 9 p. DOI: 10.1063/5.0053925

Ответственный за выпуск О.С. Ванькова

Подписано в печать 24.10.2022
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.1,
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 7

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1