

На правах рукописи

ДУБРОВСКИЙ Алексей Владимирович

**ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ
С НЕПРЕРЫВНОЙ ДЕТОНАЦИЕЙ**

01.04.17 - химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

Научный руководитель: **Фролов Сергей Михайлович**
доктор физико-математических наук,
Институт химической физики
им. Н.Н. Семенова РАН,
заведующий лабораторией

Официальные оппоненты: **Марков Владимир Васильевич**
доктор физико-математических наук,
Математический институт
им. В.А. Стеклова РАН,
ведущий научный сотрудник

Голуб Виктор Владимирович
доктор физико-математических наук,
Институт теплофизики экстремальных
состояний Объединенного института
высоких температур РАН,
заведующий отделом

Ведущая организация: ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова

Защита диссертации состоится 16 ноября 2016 года в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д.002.012.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук по адресу: 119991 Москва, ул. Косыгина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук.

Автореферат разослан 16 сентября 2016 года.

Автореферат размещен на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации 19 августа 2016 года.

Учёный секретарь
Диссертационного совета Д.002.012.02
доктор физико-математических наук

Голубков М. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последнее время интерес к непрерывно-детонационным камерам сгорания (НДКС) сильно возрос: во многих странах ведутся расчетно-экспериментальные работы по созданию энергоэффективных камер сгорания для целого спектра практических приложений в аэрокосмической технике и в энергетике. В частности, большие усилия направлены на разработку предсказательных вычислительных методик, позволяющих сократить затраты на поисковые работы и на проектирование НДКС. Этим обусловлена актуальность темы диссертационной работы.

Цели и задачи исследования. Цель исследования состояла в разработке вычислительной методики, позволяющей проводить полномасштабное трехмерное моделирование рабочего процесса в НДКС с учетом турбулентности, микросмешения и конечной скорости химических превращений. Данное исследование включало следующие задачи:

(1) разработать трехмерную физико-математическую модель рабочего процесса в НДКС, учитывающую конечное время смешения топливных компонентов, конечное время химических превращений, вязкие взаимодействия с ограничивающими поверхностями и тепловые потоки в стенки камеры; (2) провести трехмерное численное моделирование рабочего процесса в НДКС разной конфигурации с подачей гомогенной топливной смеси и с отдельной подачей топливных компонентов; (3) рассчитать основные тяговые характеристики НДКС, тепловые потоки в стенки НДКС, а также особенности течения в НДКС с газодинамическими изоляторами и лопаточными решетками; (4) изучить вопрос о допустимости использования традиционного плоского двумерного приближения с периодическими граничными условиями для моделирования физико-химических процессов в НДКС.

Научная новизна. В диссертации (1) разработана математическая модель рабочего процесса в НДКС при подаче горючего и окислителя в виде гомогенной смеси и при отдельной подаче; (2) на основе трехмерного численного моделирования рабочего процесса в НДКС определены область

существования детонации и основные параметры течения в камере, имея в виду возможность ее применения в газотурбинных двигателях (ГТД), жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) и прямоточных воздушно-реактивных двигателях (ПВРД); (3) впервые численно показано, что НДКС – камера сгорания с повышением полного давления; (4) изучен вопрос о допустимости использования плоского двумерного приближения с периодическими граничными условиями для моделирования физико-химических процессов в кольцевой НДКС; (5) рассмотрены особенности газодинамического и механического взаимодействия рабочего процесса в кольцевой камере сгорания с неподвижной турбинной решеткой; (6) произведена оценка тепловых потоков в стенки конструкции камеры; (7) с помощью многовариантных трехмерных численных расчетов доказана возможность организации непрерывно-детонационного рабочего процесса в кольцевой камере сгорания прямоточной воздушно-реактивной силовой установки в условиях полета с числом Маха 5.0 на высоте 20 км при использовании водорода в качестве топлива и атмосферного воздуха в качестве окислителя и предложены концептуальные схемы этой силовой установки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные вычислительные методики позволяют существенно сократить затраты на поисковые работы и на проектирование НДКС для дальнейшего совершенствования ГТД, ЖРД и ПВРД.

Методы исследования. В работе используется расчетно-теоретический метод исследования, в основу которого положены фундаментальные дифференциальные уравнения сохранения массы, количества движения и энергии в сжимаемых турбулентных реагирующих течениях. Указанные уравнения течения дополняются проверенными модельными уравнениями химической кинетики, уравнениями известной двухпараметрической модели турбулентности и уравнениями состояния смеси идеальных газов и решаются численно стандартным методом контрольных объемов, сопряженным со

статистическим методом Монте-Карло для уточненного моделирования микросмешения в турбулентном потоке.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Математическая модель рабочего процесса в НДКС при подаче горючего и окислителя в виде гомогенной смеси и при раздельной подаче.
- 2) Доказательство того, что в отличие от традиционных камер сгорания, в которых полное давление уменьшается, в НДКС происходит повышение полного давления.
- 3) Результаты трехмерных расчетов рабочего процесса в водородно-воздушной НДКС Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева (ИГиЛ) СО РАН и Института химической физики им. Н.Н. Семенова (ИХФ) РАН с воспроизведением геометрических размеров всех элементов экспериментальной камеры сгорания и основных режимных параметров, показывающие удовлетворительное согласие с экспериментом по всем измеряемым характеристикам.
- 4) Результаты по оптимизации конструкции НДКС ИХФ РАН.
- 5) Конструкция входного устройства-изолятора (УИ) НДКС, обеспечивающая практически полное демпфирование пульсаций давления за компрессором.
- 6) Оценки нестационарных тепловых потоков в стенки конструкции НДКС.
- 7) Результаты трехмерных численных расчетов, доказывающие возможность организации непрерывно-детонационного рабочего процесса в кольцевой камере сгорания прямоточной воздушно-реактивной силовой установки в условиях полета с числом Маха 5.0 на высоте 20 км при использовании водорода в качестве топлива и атмосферного воздуха в качестве окислителя, а также концептуальные схемы такой силовой установки.

Степень достоверности полученных результатов. Результаты трехмерных расчетов рабочего процесса в водородно-воздушной НДКС ИГиЛ СО РАН и ИХФ РАН с воспроизведением геометрических размеров всех элементов экспериментальной камеры сгорания и основных режимных

параметров показали удовлетворительное согласие с экспериментом по всем измеряемым характеристикам.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах и научных конференциях отдела горения и взрыва ИХФ РАН (2012, 2013, 2014, 2015 и 2016, г. Москва, Россия); на научных сессиях НИЯУ МИФИ (2010, 2011, 2012, 2013, 2014 и 2015, г. Москва, Россия); на VII, VIII, IX, X Международном коллоквиуме по импульсной и непрерывной детонации ICPCD (2010, 2016, г. Санкт - Петербург, Россия; 2012, г. Будва, Республика Черногория; 2014, г. Пушкин, Россия); на Симпозиуме по горению и взрыву COMBEX (2013, г. Рамзау, Австрия); на Минских международных коллоквиумах по физике ударных волн, горения и детонации (2013 и 2015, г. Минск, Беларусь).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ. Статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК - 6.

Личный вклад автора. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке вычислительных программ, проведении расчетов, их обработке и анализе, а также в подготовке статей и представлении докладов на конференциях.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, формулировки основных результатов и выводов, списка принятых обозначений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 139 страницах и содержит 80 рисунков, 9 таблиц и библиографию из 86 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и практическая значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы и пути ее достижения. Коротко описаны основные научные результаты и их научная новизна. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации: историческая справка, состояние экспериментальных и численных исследований.

Во второй главе приведено описание физико-математической модели турбулентного однофазного реагирующего течения. Рассматривается модель течения газа, а также модели фронтального и объемного горения.

Течение вязкого сжимаемого газа описывается усредненными по Рейнольдсу трехмерными нестационарными уравнениями Навье–Стокса, энергии и неразрывности химических компонентов многокомпонентной смеси. Турбулентные потоки вещества, количества движения и энергии моделируются с помощью стандартной k - ε -модели турбулентности для сжимаемых течений. Для численного решения системы уравнений Навье–Стокса используется метод контрольных объемов. В нем для каждого контрольного объема расчетной области записываются уравнения сохранения в интегральной форме и затем преобразуются к виду системы алгебраических уравнений. Данный метод хорошо известен в литературе как SIMPLE метод для решения усредненных уравнений Навье–Стокса.

Ввиду того, что все физико-химические процессы в рассматриваемой камере сгорания протекают за очень короткие времена, вкладом фронтального (ламинарного и/или турбулентного) горения в химические источники в уравнении энергии и в уравнениях неразрывности для компонентов смеси можно пренебречь. Вклады объемных реакций в указанные химические источники определялись с помощью метода частиц (МЧ).

Важнейшее преимущество МЧ – возможность определения скоростей химических реакций в турбулентном потоке без привлечения каких-либо гипотез о влиянии турбулентных пульсаций температуры и концентрации реагентов на среднюю скорость реакции. В алгоритме МЧ мгновенные локальные состояния турбулентного реагирующего течения представляются в виде набора взаимодействующих (лагранжевых) частиц. Каждая частица обладает индивидуальными свойствами: положением в пространстве, тремя

компонентами скорости, объемом, плотностью, температурой, массовыми долями химических компонентов и статистическим весом, используемым при определении средних значений переменных по ансамблю частиц. Для каждой частицы решается система уравнений сохранения массы химических компонентов, движения и энергии, причем для определения потоковых (обменных) членов используются классические модели релаксации к среднему. Уравнения модели замыкаются калорическим и термическим уравнениями состояния смеси идеальных газов с переменной теплоемкостью, а также начальными и граничными условиями. Все теплофизические параметры газа считаются переменными.

Численное решение определяющих уравнений задачи проводилось с использованием сопряженного алгоритма “метод SIMPLE – метод Монте-Карло”. Химические источниковые члены рассчитывались по неявной схеме с внутренним шагом интегрирования по времени.

Для моделирования окисления водорода применялась одноступенчатая схема реакции:



причем скорость окисления водорода определялась по формуле:

$$\frac{d[\text{H}_2]}{dt} = -A(P)P^{-1.15}[\text{H}_2]^2[\text{O}_2]e^{-E_a(\varphi)/RT}, \quad (2)$$

где $[\text{H}_2]$ и $[\text{O}_2]$ – мольные концентрации водорода и кислорода в моль/л, t – время в с, T – температура в градусах Кельвина, A – предэкспоненциальный множитель, который зависит от давления P (атм), и E_a – энергия активации, которая зависит от коэффициента избытка горючего φ . Значения A и E_a получены подгонкой функциональных зависимостей периода индукции от давления, температуры и коэффициента избытка горючего, даваемых формулой (2), к зависимостям, полученным с помощью проверенного детального кинетического механизма окисления водорода. Поскольку реакция (1) не

учитывает диссоциацию воды при высоких температурах, теплота реакции (1) изменялась так, чтобы расчетная скорость детонации Чепмена–Жуге D_{CJ} для стехиометрической водородно-воздушной смеси соответствовала ее термодинамическому значению ($D_{CJ} \approx 1970$ м/с).

В третьей главе рассмотрена задача по определению области существования устойчивого рабочего процесса в НДКС, работающей на гомогенной стехиометрической водородно-воздушной смеси, тепловое состояние стенок камеры, а также важнейшие параметры течения на входе и выходе, имея в виду возможность размещения НДКС между компрессором и турбиной в перспективной газотурбинной установке (см. рис. 1).



Рис. 1: Схема газотурбинного двигателя с НДКС.

В данной главе рассматривается НДКС высотой $L_c = 100$ мм, с диаметром внешней цилиндрической стенки $d_c = 306$ мм и кольцевым зазором шириной $\Delta = 23$ мм, работающая на гомогенной топливно-воздушной смеси (ТВС), которая подается в кольцевое входное УИ высотой $L_{ui} = 200$ мм через нижнюю границу (рис. 2а, 2б). ТВС подается в НДКС через форсуночную головку в виде двух концентрических кольцевых зазоров шириной $\delta = 7$ мм и высотой $L_s = 50$ мм, а к концу НДКС присоединено кольцевое выходное УИ высотой $L_{di} = 450$ мм. В расчете статическое давление P_{in} и температура T_{in} на нижней границе входного УИ поддерживаются постоянными.

Показано, что в НДКС выбранной конфигурации, работающей на гомогенной стехиометрической водородно-воздушной смеси возможен устойчивый рабочий процесс с одной ДВ, вращающейся над форсуночной головкой с частотой 126000 об/мин (2.1 кГц). Область существования детонации в НДКС ограничена условием $1.3 \leq P_{in} \leq 2.5$ МПа (при $T_{in} = 293$ К). Если учесть повышение температуры T_{in} вследствие адиабатического сжатия в

компрессоре, нижняя граница области существования детонации в НДКС уменьшается до $P_{in} \approx 1.0$ МПа. Во всех расчетных вариантах с устойчивым рабочим процессом полное давление в НДКС было выше P_{in} , подтверждая тем самым, что НДКС – это камера сгорания с повышением полного давления.

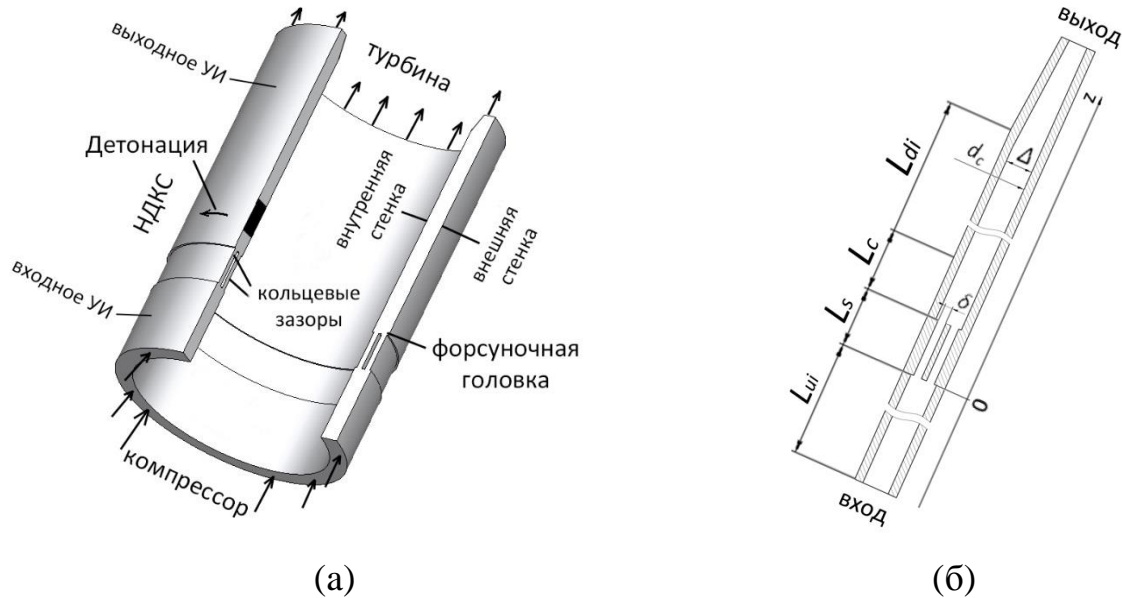


Рис. 2: Непрерывно-детонационная камера сгорания с присоединенным входным и выходным УИ (а); основные геометрические размеры камеры с продольной координатой z (б).

При моделировании особое внимание уделено характеристикам течения во входном и выходном УИ, которые предположительно должны сообщаться с компрессором и турбиной. Рассматривались УИ простейшей кольцевой формы. Расчеты показали, что амплитуда пульсаций давления во входном и выходном УИ может достигать очень высоких значений: 40%–45% от P_{in} и 30%–35% от P_{in} соответственно. Амплитуда пульсаций средней статической температуры в выходном УИ может достигать 10% от среднего уровня. Таким образом, чтобы исключить нежелательные механические нагрузки на элементы компрессора и турбины и опасные нерасчетные режимы (например, помпаж компрессора), необходимо принимать специальные меры для демпфирования таких пульсаций.

Температура продуктов детонации в выходном УИ оказалась на уровне 2500 К. Чтобы снизить температуру газа перед турбиной, предложено

разбавлять продукты детонации холодным вторичным воздухом, поступающим в выходное УИ через радиальные отверстия. Показано, что такое решение позволяет уменьшить как среднее значение статической температуры, так и амплитуду ее пульсаций в выходном УИ.

Проведены расчеты местных и полных тепловых потоков в стенке НДКС и выходного УИ. Показано, что местные тепловые потоки в окрестности форсуночной головки могут достигать очень больших значений на уровне 16 МВт/м^2 . Однако полный тепловой поток, определенный как средний интегральный тепловой поток на внутренних и внешних стенках НДКС и выходного УИ, оказался на уровне $2.5\text{--}3.5 \text{ МВт/м}^2$ и зависел от давления подачи ТВС P_{in} .

В четвертой главе методами численного моделирования определены особенности газодинамического и механического взаимодействия рабочего процесса в НДКС с внутренней и внешней стенками диаметром 260 и 306 мм с неподвижной турбинной решеткой (сопловым аппаратом). Имея в виду само существование рабочего процесса, оценены силы, действующие на турбинную решетку в нестационарном потоке продуктов детонации.

На рис. 3 представлены четыре расчетных варианта НДКС с кольцевым зазором шириной $\Delta = 23 \text{ мм}$: без турбинной решетки (а) и с турбинной решеткой с разным углом α отклонения лопаток по отношению к оси потока: (б) 0° , (в) 20° и (г) -20° . Во всех вариантах в НДКС подается стехиометрическая смесь водорода с воздухом под давлением $P_{in} = 9 \text{ атм}$ при температуре $T_{in} = 550 \text{ К}$. К выходному сечению НДКС присоединено расширяющееся сопло с центральным телом в виде конуса. Турбинная решетка высотой 9 см состоит из 33 одинаковых равноудаленных лопаток и установлена в расширяющейся части потока.

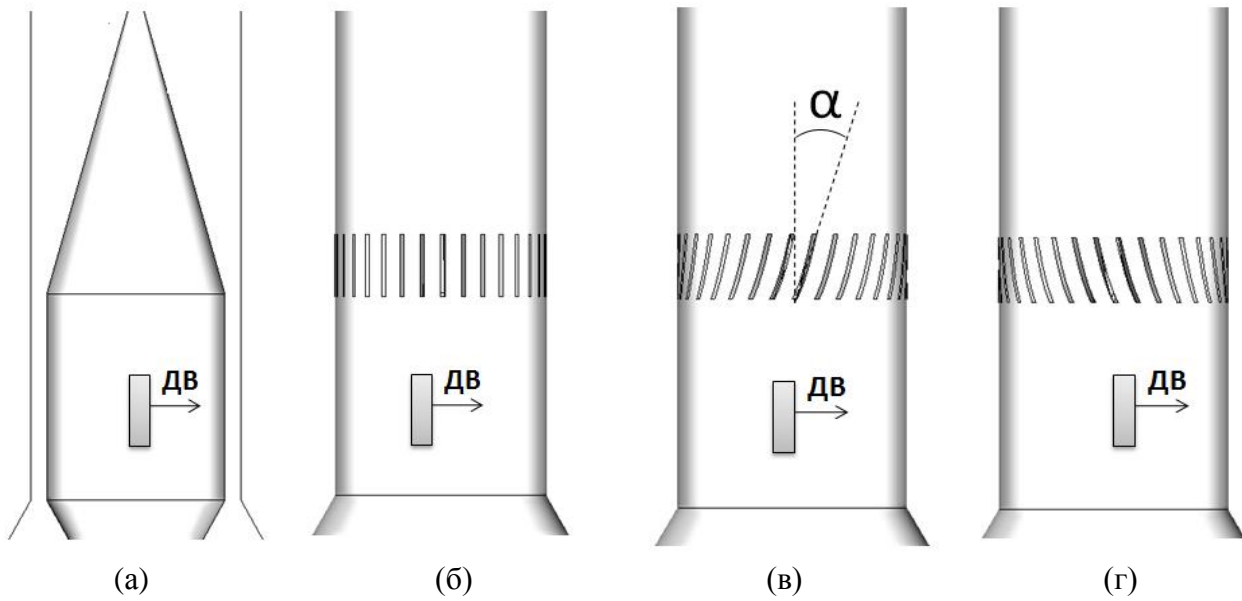


Рис. 3: Схемы НДКС без турбинной решетки (а) и с турбинной решеткой с разным углом α отклонения лопаток по отношению к оси потока: (б) 0° , (в) 20° , (г) -20° .

В табл. 1 представлены варианты и результаты расчетов, где \dot{m} – средний массовый расход смеси в камере сгорания, g – удельный расход смеси, D – скорость вращения ДВ, ν – частота вращения ДВ, F_ϕ – средняя по времени тангенциальная сила, действующая на одну лопатку и F_z – средняя по времени осевая сила, действующая на одну лопатку. Отрицательное значение тангенциальной силы свидетельствует о том, что направление силы, действующей на турбинную решетку, противоположно направлению вращения ДВ в НДКС.

Таблица 1: Варианты и результаты расчетов.

Вариант	α	\dot{m} , кг/с	g , кг/(с·м ²)	Установившийся режим	D , м/с	ν , кГц	F_ϕ , Н	F_z , Н
а	-	11.5	562	1 ДВ	1820	2	-	-
б	0°	9.7	474	2 ДВ	1700	3.8	-16	0
в	20°	9.2	450	2 ДВ	1750	3.9	-60	32
г	-20°	-	-	-	-	-	-	-

Показано, что размещение неподвижной турбинной решетки на выходе из камеры сгорания может приводить к изменению рабочего режима (увеличению количества одновременно вращающихся ДВ, уменьшению среднего массового расхода горючей смеси и др.) или к исчезновению рабочего режима. Влияние турбинной решетки на рабочий режим зависит от угла наклона лопаток по отношению к оси камеры и от направления вращения ДВ. Поток за турбинной решеткой характеризуется существенно меньшими амплитудами пульсаций давления, чем перед решеткой. Амплитуда пульсаций тангенциальной и осевой сил, действующих на лопатки турбинной решетки, а также средние по времени значения этих сил существенно зависят от угла наклона лопаток.

В пятой главе проведены трехмерные расчеты рабочего процесса в водородно-воздушной НДКС конструкции ИГиЛ СО РАН с воспроизведением геометрических размеров всех элементов экспериментальной камеры сгорания и основных режимных параметров. В отличие от предыдущих глав, в которых подается предварительно перемешанная водородно-воздушная смесь, в этой главе горючая смесь формируется при отдельной подаче водорода и воздуха, как в эксперименте.

На рис. 4 показана схема расчетной области, включающей воздушный ресивер 1, патрубок воздушного коллектора 2, воздушный коллектор 3, топливный коллектор 4, НДКС 5 и выходной ресивер 6 с размерами основных элементов. Камера сгорания представляет собой осесимметричный кольцевой канал с внутренним и наружным диаметрами кольцевого зазора $d_{int} = 260$ мм и $d_{ext} = 306$ мм соответственно (ширина зазора $\Delta = 23$ мм) и длиной $L_c = 665$ мм. Осевое расстояние z отсчитывается от днища НДКС ($z = 0$). Между днищем и внешней стенкой камеры предусмотрена кольцевая щель шириной $\delta = 2$ мм для подачи воздуха в осевом направлении из воздушного коллектора. Горючее (водород) поступает в камеру из топливного коллектора в радиальном направлении через 200 одинаковых отверстий, расположенных равномерно по окружности внешней стенки камеры на расстоянии $z = L_f = 1$ мм. Общая площадь сечения отверстий $S_f = 40$ мм². Левый конец воздушного коллектора 3

соединен с воздушным ресивером 1 размером 200x200x200 мм через один патрубок 2 квадратного сечения 28x28 мм. Правый конец камеры сгорания 5 соединен с выходным ресивером 6 размером 2500x900 мм.

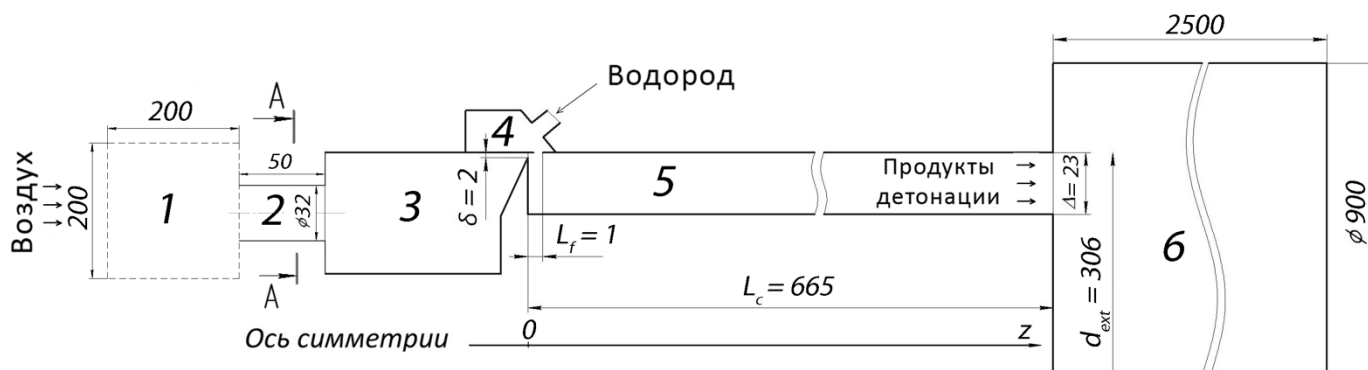
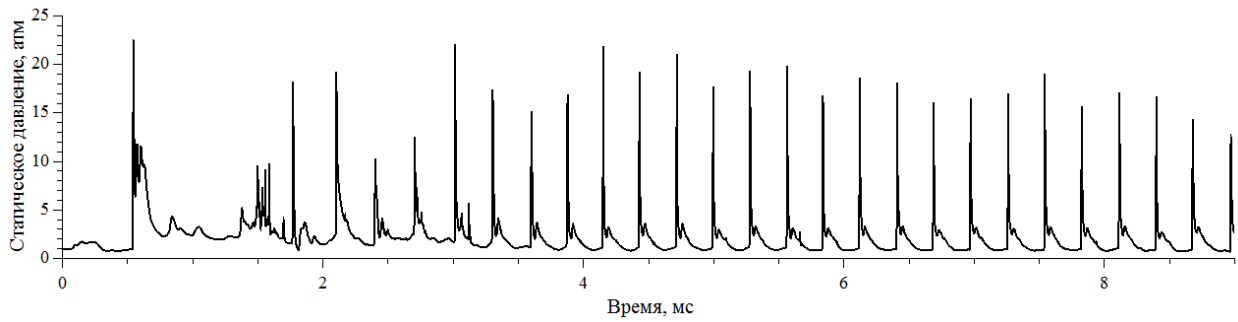


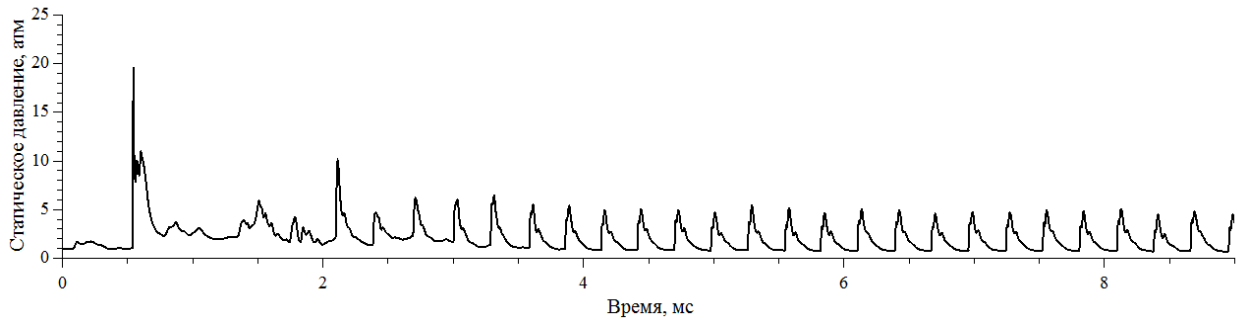
Рис. 4: Геометрические размеры НДКС. 1 – воздушный ресивер; 2 – патрубок воздушного коллектора; 3 – воздушный коллектор; 4 – топливный коллектор; 5 – камера сгорания; 6 – выходной ресивер. Размеры указаны в миллиметрах.

Входные граничные условия для воздушного потока задавались на входе в воздушный ресивер 1 (P_1 , T_1 , k_1 , ε_1 и $Y_{i,1}$), а входные граничные условия для потока горючего на входе в водородный коллектор 4 (P_4 , T_4 , k_4 , ε_4 и $Y_{i,4}$). Входные граничные условия задавались в виде фиксированных значений давления ($P_4 = 37$ атм, $P_1 = 22.5$ атм), температуры ($T_1 = T_4 = 293.15$ К), турбулентной кинетической энергии ($k_1 = k_4 = 0.001$ м²/с²) и ее диссипации ($\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = 0.0078845$ м²/с³), а также средних массовых долей компонентов смеси ($Y_{O_2,1} = 0.23$, $Y_{N_2,1} = 0.77$, $Y_{H_2,1} = 0$; $Y_{O_2,4} = 0$, $Y_{N_2,4} = 0$, $Y_{H_2,4} = 1$).

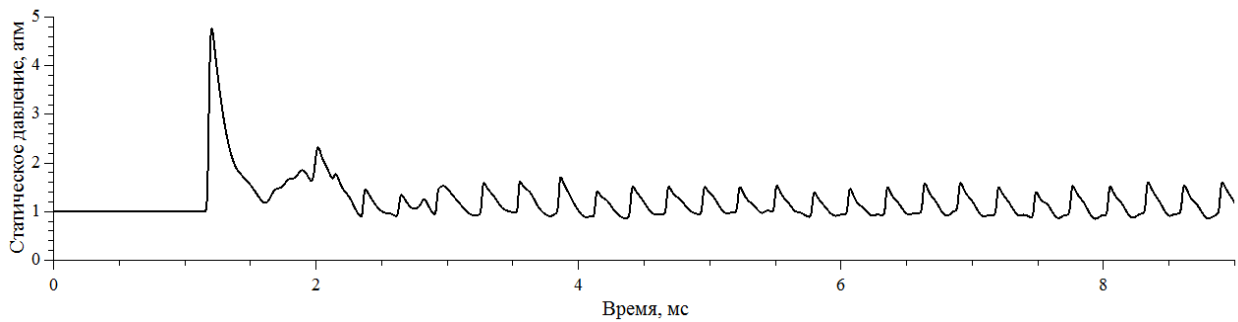
На рис. 5 представлены расчетные зависимости статического давления от времени в разных точках НДКС: в точке, расположенной на внешней стенке на расстоянии $z = 40$ мм (рис. 5а); в точке, расположенной на внутренней стенке на расстоянии $z = 40$ мм (рис. 5б); и в точке, расположенной в центре кольцевого зазора НДКС на расстоянии $z = 665$ мм (рис. 5в). Из сравнения рис. 5а и 5б следует, что пики давления в детонационных волнах на внешней стенке НДКС существенно (в три и более раз) выше, чем на внутренней стенке – факт, который связан с особенностями дифракции детонационных волн на сжимающей (внешней) и расширяющей (внутренней) стенках цилиндрического



(а)



(б)



(в)

Рис. 5: Расчетные зависимости статического давления от времени в разных точках НДКС: (а) в точке, расположенной на внешней стенке на расстоянии $z = 40$ мм; (б) в точке, расположенной на внутренней стенке на расстоянии $z = 40$ мм; (в) в точке, расположенной в центре кольцевого зазора НДКС на расстоянии $z = 665$ мм.

кольцевого зазора. Этот факт показывает, что моделирование физико-химических процессов в кольцевой НДКС на основе аппроксимации существенно трехмерного течения упрощенным плоским двумерным течением с периодическими граничными условиями может приводить к некорректным результатам, особенно при анализе смешения

топливных компонентов, тепловых нагрузок на стенки камеры, прочности стенок и т.д.

На рис. 6 показаны расчетные распределения удельных тепловых потоков во внутреннюю и во внешнюю стенки НДКС в установившемся режиме работы в точках вдоль образующих внутренней и внешней стенок НДКС, параллельных оси z . Максимальное значение удельного теплового потока (~ 1.7 МВт/м²) достигается на внутренней стенке вблизи днища НДКС (при $z = 0 - 50$ мм). Удельный тепловой поток во внешнюю стенку всегда меньше, чем во внутреннюю, а его максимальное значение (~ 0.95 МВт/м²) достигается на расстоянии 150–200 мм от днища НДКС. Средний суммарный удельный тепловой поток в стенки НДКС составляет около 0.9 МВт/м².

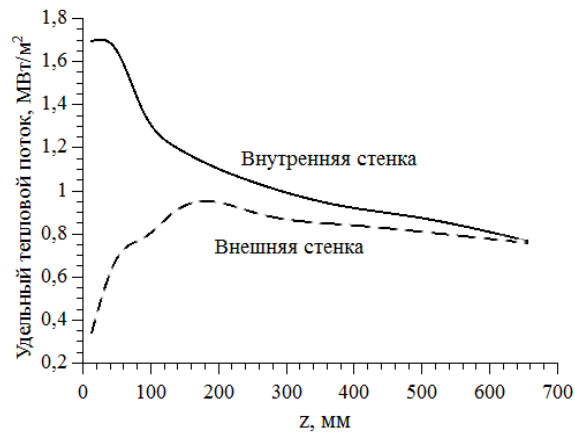


Рис. 6: Расчетные распределения удельных тепловых потоков во внутреннюю и во внешнюю стенки НДКС в установившемся режиме работы.

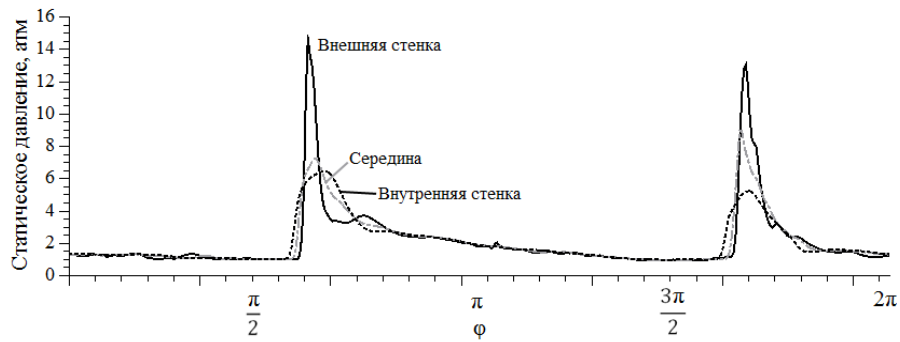
Результаты расчетов по всем измеряемым характеристикам удовлетворительно согласуются с экспериментом. Так, после инициирования детонации и переходного процесса длительностью ~ 5 мс в НДКС устанавливается рабочий режим с двумя детонационными волнами, непрерывно циркулирующими в кольцевом зазоре со средней скоростью 1700 м/с (частота 3.5 кГц). Расчетная максимальная высота активного слоя водородно-воздушной смеси составляет $\sim 90 \div 110$ мм. Среднее статическое давление достигает максимального значения ~ 2.3 атм на расстоянии около 20 мм над днищем НДКС у внешней стенки и почти монотонно снижается до ~ 1.1

атм в выходном сечении НДКС. Средняя статическая температура вещества достигает максимума ~ 2000 К в окрестности днища в зоне рециркуляции горячих продуктов у внутренней стенки и снижается до ~ 1700 К в выходном сечении НДКС. Давление в воздушном коллекторе пульсирует с амплитудой ± 0.1 атм, а в выходном сечении НДКС – с амплитудой ± 0.3 атм. Расчетные значения расходов воздуха и водорода составляют 3.4 ± 0.1 и 0.106 кг/с, соответствующие удельному расходу смеси 171.5 кг/(с·м²).

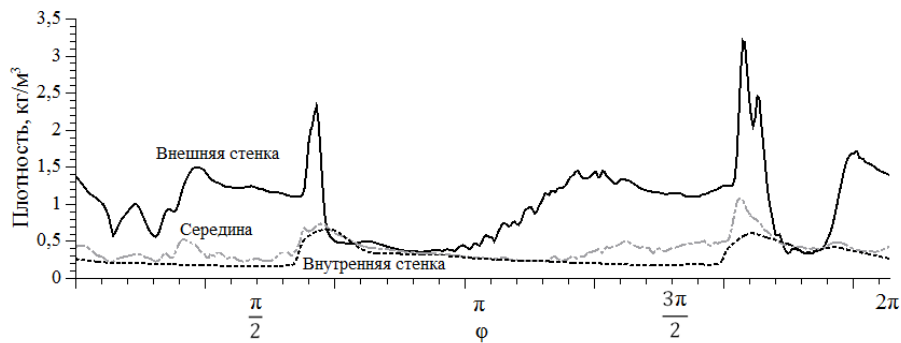
Специально изучен вопрос о допустимости использования плоского двумерного приближения с периодическими граничными условиями для моделирования физико-химических процессов в кольцевой НДКС. Трехмерные расчеты показывают, что распределения плотности, температуры и числа Маха в различных сечениях камеры сгорания (см. рис. 7) являются существенно трехмерными, тогда как распределение статического давления с увеличением расстояния от днища НДКС приближается к двумерному. Кроме того, общепринятое предположение о сверхзвуковом истечении на выходе двумерной расчетной области не всегда корректно: в выходном сечении могут существовать обширные зоны дозвукового истечения продуктов детонации.

В шестой главе проведены трехмерные расчеты рабочего процесса в водородно-воздушной НДКС с отдельной подачей водорода и воздуха конструкции ИХФ РАН с воспроизведением геометрических размеров всех элементов экспериментальной камеры сгорания и основных режимных параметров.

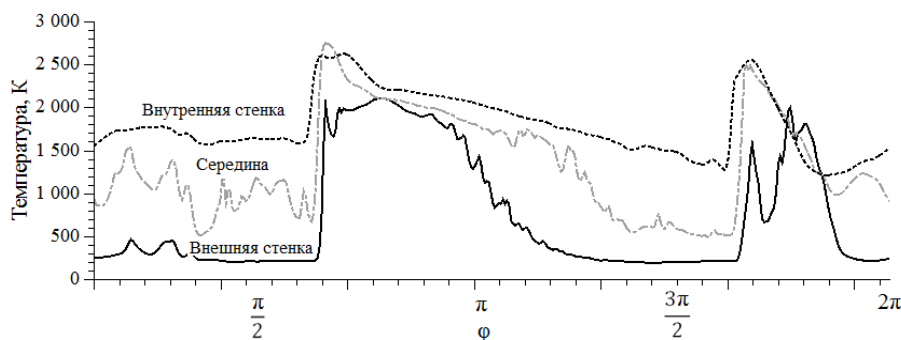
Непрерывно-детонационная камера сгорания базовой конфигурации (рис. 8) – кольцевая камера с внешним диаметром 406 мм, длиной $H = 310$ мм и кольцевым зазором шириной $\Delta = 25$ мм. Воздух подается в воздушный коллектор через четыре патрубка круглого сечения, тангенциально подсоединённых к внешней стенке НДКС к воздушному коллектору.



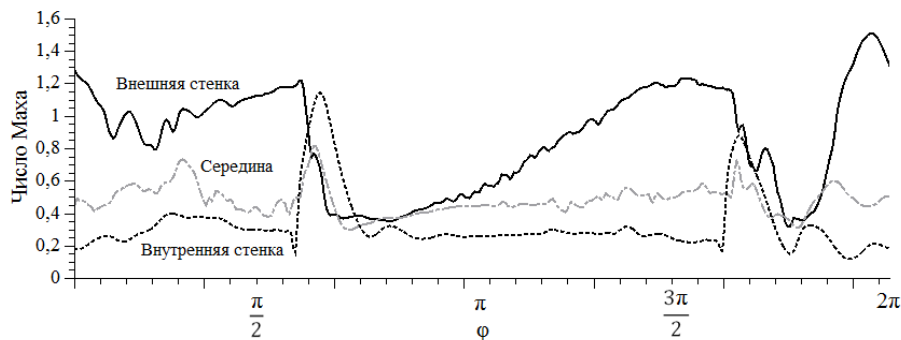
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 7: «Развертка» решения трехмерной задачи в окрестности внешней стенки, середины кольцевого зазора и внутренней стенки НДКС на плоскость (φ – азимутальный угол) в момент времени 7.1 мс при $z = 40$ мм: (а) статическое давление, (б) плотность, (в) температура, (г) число Маха.

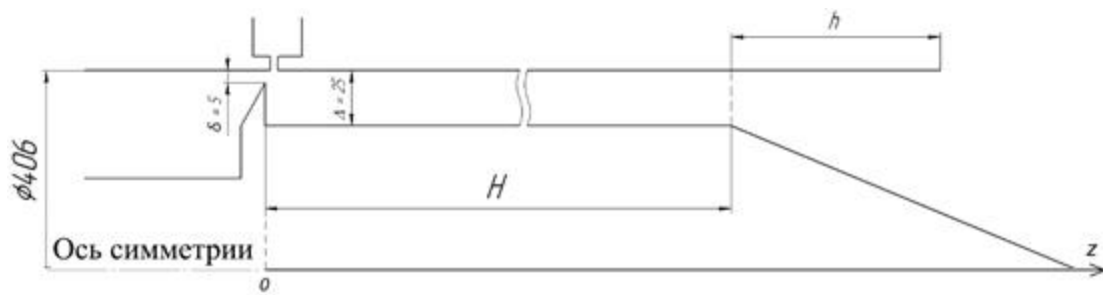


Рис. 8: Схема НДКС. Размеры указаны в миллиметрах.

Воздух из воздушного коллектора подается в камеру сгорания через кольцевое отверстие шириной $\delta = 5$ мм между диском с заостренным краем и внешней стенкой. Водород поступает в камеру сгорания из водородного коллектора через 240 радиальных отверстий диаметром 1 мм, равномерно распределенных по окружности внешней стенки на расстоянии 1 мм над воздушным зазором. Другой конец НДКС сообщается с окружающей средой через выходное сопло с центральным телом в виде конуса или усеченного конуса с полу-углом при вершине 23° и с обечайкой длиной $h = 295$ мм, ограничивающей скорость расширения потока.

Входные граничные условия для потоков окислителя и горючего задаются на входе патрубков в соответствующие коллектора в виде фиксированных значений массовых расходов равных 6.4 кг/с и 0.26 кг/с, при температуре $T = 293.15$ К. Расходы соответствуют суммарному коэффициенту избытка водорода $\varphi = 1.4$, а удельный массовый расход смеси равен 222.5 кг/(с·м²).

Начальные условия для средних параметров течения формулируются следующим образом. Предполагается, что в начальный момент времени воздушный коллектор заполнен покоящимся воздухом под статическим давлением $P_a = 4$ атм, а водородный коллектор заполнен покоящимся водородом под статическим давлением $P_h = 18$ атм, а вся остальная область заполнена покоящимися охлажденными продуктами горения при атмосферном давлении.

На рис. 9 представлены некоторые результаты базового расчета в виде полей статической температуры, статического давления, массовой доли водорода и числа Маха вблизи внешней стенки НДКС через 7.65 мс после зажигания, когда в камере устанавливается режим с одной ДВ. Высота фронта составляет ~200–220 мм (~8–9 λ). В данном случае диск Маха находится внутри камеры сгорания, что свидетельствует о неоптимальной конфигурации сопла.

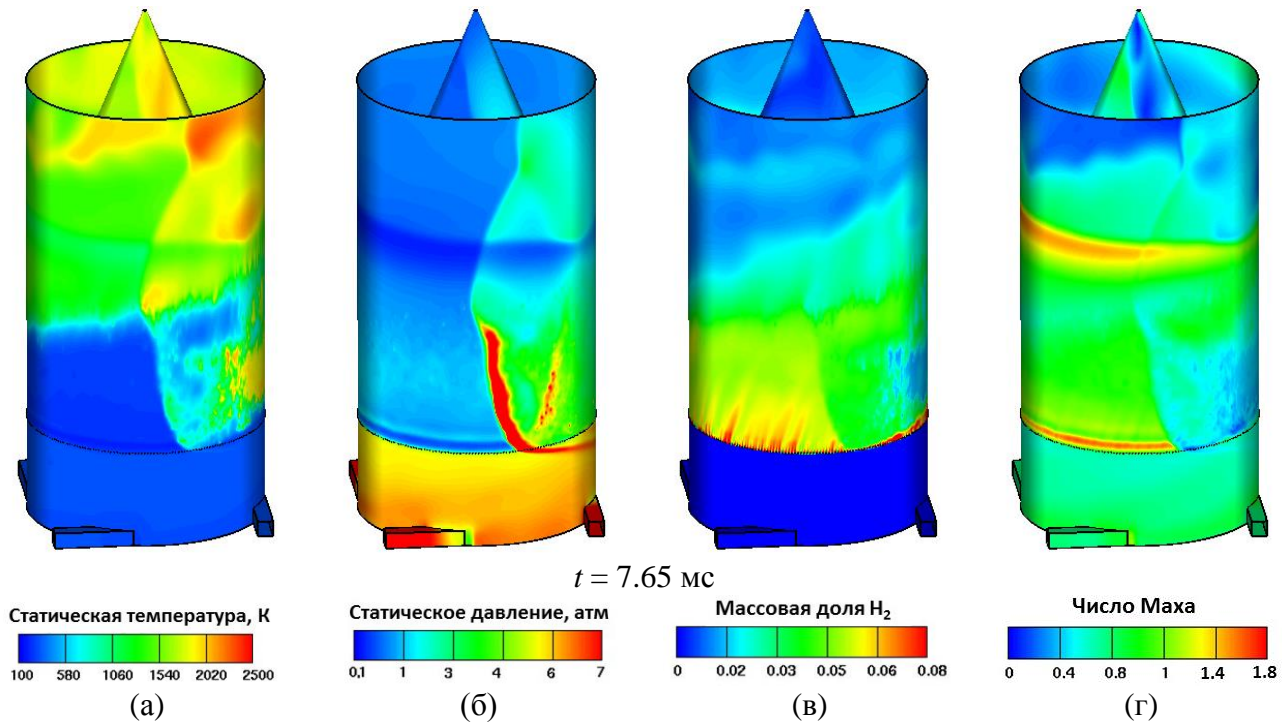


Рис. 9: Расчетные поля статической температуры, статического давления, массовой доли водорода и числа Маха в окрестности внешней стенки НДКС в момент времени $t = 7.65$ мс для базовой конфигурации. Детонация распространяется справа налево.

На рис. 10 представлено сравнение расчетной (точка) и измеренной в эксперименте (кривая) частоты вращения ДВ в НДКС базовой конфигурации. И в расчете, и в эксперименте наблюдается режим с одной ДВ, вращающейся с частотой около 1460–1490 Гц. Эта частота вращения соответствует скорости ДВ ~ 1860 м/с.

На рис. 11 приведено сравнение расчетной (точка) и измеренной в эксперименте (кривая) тяги F НДКС базовой конфигурации. Стоит отметить,

что F состоит из тяги, создаваемой продувкой воздухом и водородом, и тяги, создаваемой непосредственно самим детонационным горением. Расчетный уровень F составил 4.5 кН, согласующийся в пределах 7% с экспериментальным значением 4.3 кН. Следует отметить, что расчеты были проведены при фиксированных значениях статического давления в воздушном и водородном коллекторах, тогда как в ходе эксперимента эти значения падали и соответственно падала сама тяга (см. рис. 11 штриховая линия).

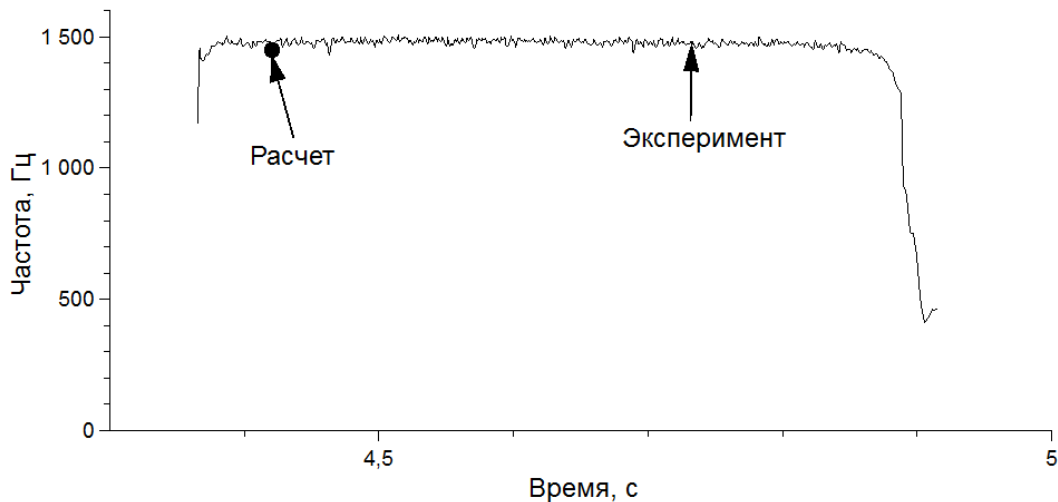


Рис. 10: Расчетная (точка) и измеренная в эксперименте (кривая) частота вращения ДВ в НДКС базовой конфигурации.

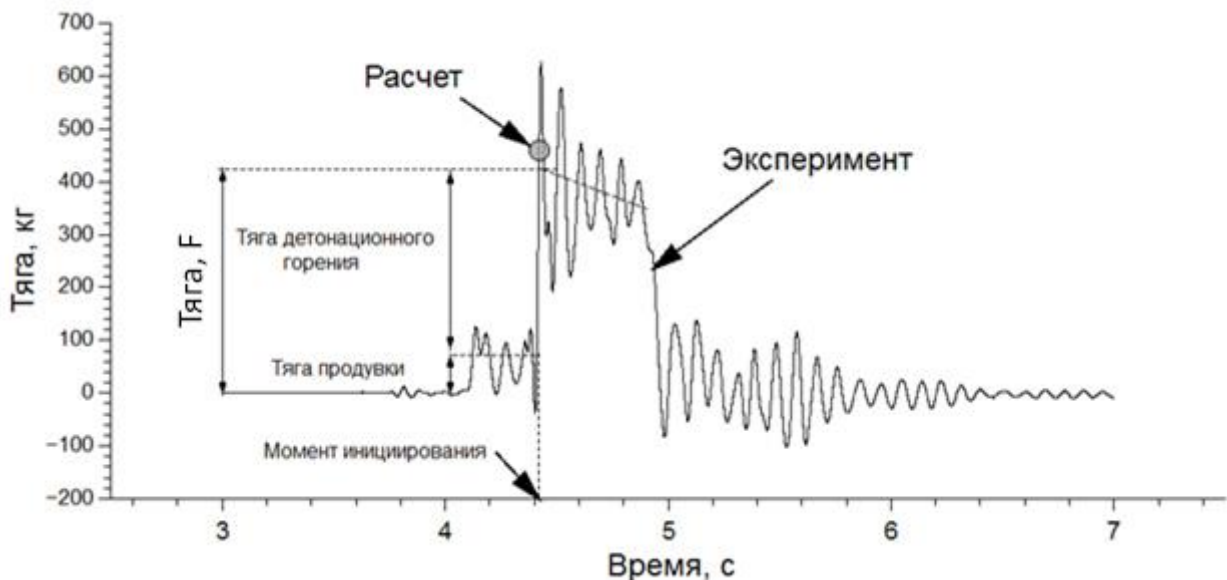


Рис. 11: Расчетная (точка) и измеренная в эксперименте (кривая) тяги F НДКС базовой конфигурации.

Оптимизация НДКС подразумевает параметрическое исследование влияние высоты камеры H , общего коэффициента избытка горючего φ и сопла на тяговые характеристики камеры. В табл. 2 представлены варианты и результаты расчетов.

Таблица 2: Варианты и результаты расчетов.

Вариант	H , мм	h , мм	φ	\dot{m}_{air} , кг/с	\dot{m}_{H_2} , кг/с	g , кг/(с·м ²)	Установившийся режим	Тяга (расчет), кН
1	155	295	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	3.7
2*	310	295	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	4.5
3	465	295	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	4.3
4	395	295	0.55	6.4	0.1	217	Срыв	0.35
5	395	295	0.8	6.4	0.144	219	Пульсирующий	2.25
6	395	295	1.0	6.4	0.18	220	1 ДВ	6.1
7	395	295	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	6.5
8	310	0	1.4	6.4	0.26	222	2 ДВ	7.4
9	310	94.5	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	5.9
10	310	152	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	5.1
11	310	294	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	4.8
12	395	0	1.4	6.4	0.26	222	2 ДВ	7.7
13**	395	0	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	6.6
14***	395	0	1.4	6.4	0.26	222	1 ДВ	7.1

* - базовая конфигурация; ** - срезанный конус; *** - сопряжение с пространством

В результате оптимизации показано, что максимальная тяга (7.7 кН) достигается при длине камеры 395 мм, близкой к ее внешнему диаметру, при использовании конического центрального тела в отсутствие обечайки. Уменьшение длины камеры, установка обечайки и использование центрального тела в форме усеченного конуса, а также расширение выхлопной струи в полное пространство приводят к уменьшению тяги. Вычислительная методика ИХФ РАН может использоваться для оптимизации конструкции и режима работы НДКС с целью повышения ее характеристик.

В седьмой главе рассмотрена задача о возможности организации непрерывно-детонационного рабочего процесса в НДКС с кольцевым зазором шириной $\Delta = 23$ мм и с внутренней и внешней стенками диаметром 260 и 306

мм. Окислитель (воздух) под давлением $P_{in} = 9$ атм при температуре 550 К подается в НДКС через входное УИ в осевом направлении. Горючее (водород) подается в НДКС из топливных коллекторов через 80 радиальных форсуночных отверстий – 40 в наружной стенке и 40 во внутренней стенке. Давление и температура водорода на входе в топливные коллекторы поддерживаются постоянными и равными 27 атм и 298 К. К выходному сечению НДКС присоединено расширяющееся сопло с центральным телом в виде конуса и ресивер. Предложена новая конструкция УИ, обеспечивающая практически полное демпфирование пульсаций давления за компрессором.

Что касается полного давления, то его расчетное распределение в НДКС в периодическом детонационном режиме показано на рис. 12 сплошной серой кривой. Для сравнения штриховой черной кривой показано распределение полного давления в той же камере сгорания в установившемся дефлаграционном режиме. Из рис. 12 видно, что в отличие от дефлаграционного режима, в котором полное давление вдоль оси камеры уменьшается, в детонационном режиме рабочий процесс протекает с повышением полного давления до 10.3 атм, т.е. на 14-15% выше P_{in} .

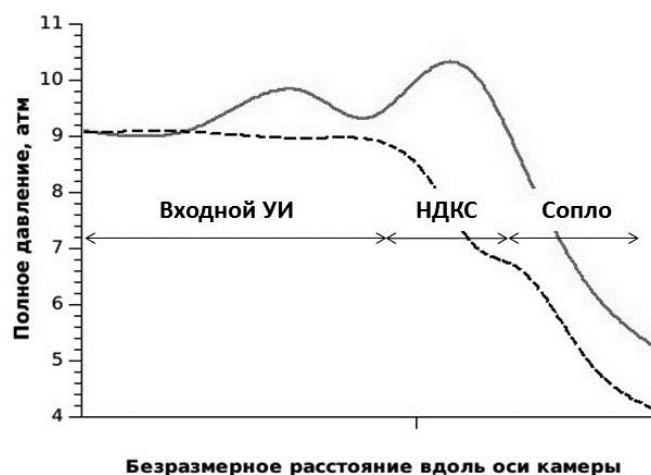


Рис. 12: Расчетные распределения усредненного по сечению полного давления вдоль оси кольцевой камеры сгорания при детонации (сплошная серая кривая) и дефлаграции (штриховая черная кривая).

В восьмой главе предложены концептуальные схемы осесимметричной силовой установки с внешним диаметром проходного сечения 400 мм и длиной от 1.3 до 1.5 м со сверхзвуковым входным устройством, расширяющейся кольцевой камерой сгорания и выходным соплом с усеченно-коническим центральным телом (см. рис. 13). Расчеты внутреннего и внешнего течений с учетом конечной скорости турбулентно-молекулярного смешения компонентов горючего друг с другом и с продуктами их горения, а также конечной скорости химических превращений и вязкого взаимодействия течения с ограничивающими поверхностями показали, что в указанных условиях полета двигатель такой силовой установки может иметь следующие характеристики: тягу 10.7 кН, удельную тягу 0.89 кН*с/кг, удельный импульс 1210 с и удельный расход топлива 0.303 кг/Н/час. При этом в камере сгорания может быть реализован рабочий процесс с одной детонационной волной, бегущей в кольцевом зазоре со средней скоростью 1695 м/с, а частота вращения детонационной волны равна 1350 Гц. Показано, что в камере сгорания существуют зоны дозвукового течения продуктов детонации, однако в ее выходном сечении течение везде сверхзвуковое.

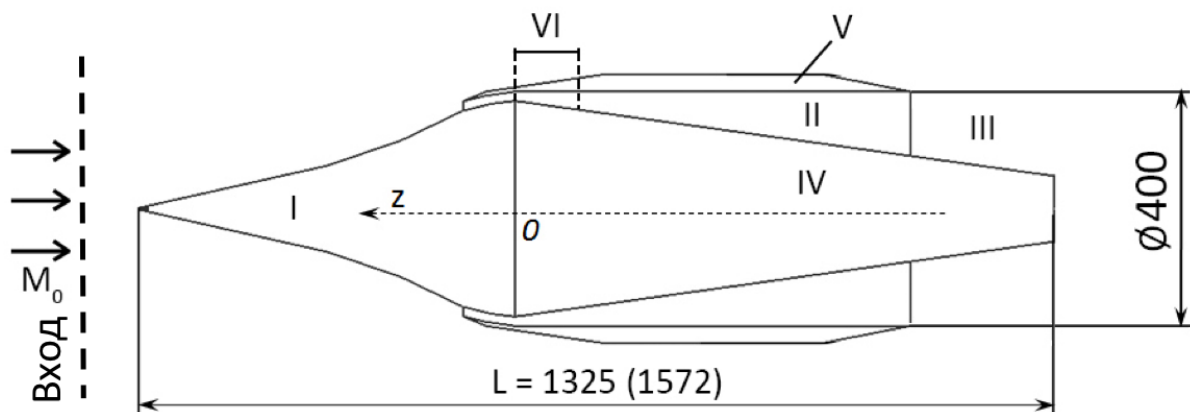


Рис. 13: Две схемы ($L=1325$ и $L=1572$) прямооточной воздушно-реактивной силовой установки с непрерывно-детонационной камерой сгорания. Размеры указаны в миллиметрах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые разработана трехмерная вычислительная методика расчетов рабочего процесса в НДКС при подаче топливных компонентов в виде гомогенной смеси и при их отдельной подаче с учетом турбулентно-молекулярного смешения топливных компонентов и конечной скорости химических превращений.

2. Проведено трехмерное численное моделирование рабочего процесса в НДКС разной конфигурации с подачей гомогенной топливной смеси и с отдельной подачей топливных компонентов, рассчитаны основные тяговые характеристики НДКС, тепловые потоки в стенки НДКС, а также рассмотрены особенности течения в НДКС с газодинамическим изолятором и лопаточными решетками, имея в виду возможность ее применения в ГТД.

3. С помощью трехмерных численных расчетов доказано, что НДКС – это камера сгорания с повышением полного давления.

4. Предложены новые концептуальные схемы силовой установки ПВРД с НДКС. С помощью многовариантных трехмерных численных расчетов доказана возможность организации непрерывно-детонационного рабочего процесса в такой силовой установке в условиях полета с числом Маха 5.0 на высоте 20 км при использовании водорода в качестве топлива и атмосферного воздуха в качестве окислителя. Для тяги и удельного импульса двигателя осесимметричной конструкции длиной 1.5 м и с внешним диаметром проходного сечения 400 мм получены значения 10.7 кН и 1210 с.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией // Химическая физика. - 2012. - Т. 31. - N. 3. - С. 32-45.
2. Фролов С.М., Дубровский А.В., Иванов В.С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией при отдельной подаче горючего и окислителя // Химическая физика. - 2013. - Т. 32. - N. 2. - С. 56-65.
3. Фролов С.М., Аксёнов В.С., Дубровский А.В., Иванов В.С., Шамшин И.О. Энергоэффективность непрерывно-детонационных камер сгорания // Физика горения и взрыва. - 2015. - Т. 51. - N. 2. - С. 102 – 117.
4. Дубровский А. В., Иванов В. С., Фролов С. М. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в непрерывно-детонационной камере сгорания с отдельной подачей водорода и воздуха // Химическая физика. - 2015. - Т. 34. - N. 2. - С. 65–81.
5. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангиев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Доклады академии наук. - 2015. - Т. 465. - N. 1. - С. 62–67.
6. Дубровский А. В., Иванов В. С., Зангиев А. Э., Фролов С. М. Трехмерное численное моделирование характеристик прямооточной воздушно-реактивной силовой установки с непрерывно-детонационной камерой сгорания в условиях сверхзвукового полета // Химическая физика. - 2016. - Т. 35. - N. 6. - С. 49–63.