

На правах рукописи

*Богачева*

**Богачева Дарья Юрьевна**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО (ЗАВЕСНОГО) ОХЛАЖДЕНИЯ РАКЕТНОГО  
ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ ГАЗООБРАЗНЫХ  
КОМПОНЕНТАХ ТОПЛИВА**

Специальность 05.07.05

Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Козлов Александр Александрович**

**Официальные оппоненты:** **Ягодников Дмитрий Алексеевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
Заведующий кафедрой "Ракетные двигатели"

**Александров Лев Григорьевич,**  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение имени С.А.Лавочкина» (ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина»)  
Начальник сектора отдела "Двигательные установки"

**Ведущая организация:** Открытое акционерное общество «Военно-промышленная корпорация "Научно-производственное объединение машиностроения"» (ОАО ВПК "НПО машиностроения")

Защита состоится «25» декабря 2014 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) <http://www.mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан: «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного  
совета Д212.125.08,  
д. т. н., профессор



Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Задачи дальнейшего освоения космического пространства и расширения использования космических средств для мониторинга, связи, метеорологии, обороны и науки имеют большое практическое значение в настоящее время. Решение таких целенаправленных задач привело к необходимости создания управляемых космических летательных аппаратов (КЛА). В качестве исполнительных органов системы управления (СУ) КЛА используются ракетные двигатели малых тяг (РДМТ), которые обеспечивают ориентацию объекта в пространстве, ускорение, торможение, коррекцию траектории и ряд других операций.

Одной из важных тенденций развития ракетного двигателестроения является разработка надежных и высокоэффективных РДМТ, работающих на экологически чистых несамовоспламеняющихся компонентах топлива (КТ): керосин+O<sub>2</sub>, керосин+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>.

Высокая эффективность работы (высокий удельный импульс) может быть реализована при соотношениях КТ, близких к стехиометрическим. При таком соотношении температура продуктов сгорания (ПС) находится на уровне 2800-3500 К (при давлении в камере сгорания (КС)  $p_k = 1$  МПа и коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 1$  для КТ керосин+O<sub>2</sub>, керосин+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>). Поэтому при применении высокоэнергетичных топлив проблема надежной тепловой защиты РДМТ остается актуальной.

Наиболее распространенным методом защиты стенок КС РДМТ от высокотемпературных ПС (конвективного и радиационного тепловых потоков) является, так называемое, внутреннее (завесное) охлаждение.

Завесное охлаждение осуществляется путем создания около стенки низкотемпературного пристеночного слоя газа или жидкости. Охлаждающий компонент (окислитель или горючее) подается на внутреннюю поверхность стенки КС через отверстия или щели различной конфигурации. Использование завесного охлаждения сопровождается определенными потерями удельного импульса. Эти потери будут тем больше, чем ниже температура в пристеночном слое. Пристеночный слой образуется в результате перемешивания завесы и потока от периферийного (наиболее близкого к стенке КС) ряда форсунок смесительной головки. Температура в пристеночном слое, в свою очередь, зависит от целого ряда факторов, таких как: соотношение КТ в периферийных форсунках (в случае применения двухкомпонентных форсунок), расхода охладителя, конструктивного исполнения системы завесного охлаждения и других.

Основными критериями выбора параметров завесного охлаждения является его тепловая и энергетическая эффективность. Под тепловой эффективностью подразумевается способность завесы предотвращать нагрев стенки КС выше максимальной рабочей температуры материала. Под энергетической эффективностью понимается минимизация потерь удельного импульса от использования завесы. Эти два критерия являются противоречивыми.

Таким образом, исследование эффективной организации рабочего процесса в КС РДМТ с учетом завесного охлаждения на несамовоспламеняющихся топливах является актуальной научно-технической задачей. Эта актуальность, прежде всего, связана с отсутствием инженерной методики расчета турбулентного перемешивания завесы с основным потоком ПС применительно к рабочим процессам в РДМТ. Кроме того, в настоящее время используются методики расчета, основывающиеся на экспериментальных коэффициентах, при этом развитие инструментов компьютерного моделирования позволяет проводить численные эксперименты с высоким уровнем точности. Совершенствование

методик расчета высокоэффективных РДМТ на основе численного моделирования внутрикамерных процессов является актуальной научной задачей.

**Объектом исследования** является РДМТ, работающий на несамовоспламеняющихся экологически чистых газообразных КТ:  $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ .

**Целью работы** является повышение эффективности разработки РДМТ, работающего на непрерывном режиме путем применения численного моделирования внутрикамерных процессов в РДМТ с учетом завесного охлаждения.

**Основные задачи**, решаемые в диссертационной работе:

1. Анализ современного состояния моделирования завесного охлаждения в ЖРД.
2. Выбор математической модели и метода математического моделирования теплового состояния РДМТ для проведения расчетов.
3. Верификация модели по огневым испытаниям РДМТ с целью определения теплового состояния КС и оценки адекватности использованных математических моделей и принятых при расчетах допущений.
4. Разработка рекомендаций по моделированию внутрикамерных процессов в РДМТ с использованием пакетов прикладных программ вычислительной гидрогазодинамики.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Проведен анализ влияния основных параметров системы охлаждения (параметра вдува  $M$ , конструктивного исполнения системы охлаждения и способа подачи охладителя: высоты щели, толщины стенки над щелью, угла выхода охлаждающего газа, способа ввода охлаждающего компонента (радиально или тангенциально), расположения щелей завесы относительно форсунок и т.д.) на тепловое состояние КС РДМТ.
2. Проведено численное моделирование теплового состояния КС с учетом завесного охлаждения.
3. На основе проведенных экспериментальных исследований уточнена математическая модель турбулентного перемешивания завесы с продуктами сгорания основного потока с учетом особенностей двигателей малых тяг.
4. Даны рекомендации по моделированию внутрикамерных процессов в РДМТ.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Усовершенствованная инженерная методика расчета турбулентного перемешивания завесы с ПС основного потока позволяет уточнить прогнозирование теплового состояния стенки КС и сопла. Показано, что корректное численное моделирование (корректная постановка граничных условий) теплового состояния стенки КС с помощью современного программного комплекса ANSYS CFX не уступает по точности определения характеристик теплообмена в РДМТ экспериментальным данным, позволяет дополнить, а в некоторых случаях заменить дорогостоящий эксперимент с целью получения распределения профиля температур в пристеночном слое вдоль стенки КС с приемлемой для инженерной практики точностью.

**Степень обоснованности и достоверности** полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- использованием известных научных положений и методов исследований;
- применением сертифицированных программных средств для численных расчетов задач механики сплошной среды;
- согласованием результатов численного эксперимента с экспериментальными данными.

**Основным вкладом диссертанта** является предложенная и разработанная математическая модель теплового состояния РДМТ, работающего на непрерывном режиме на газообразных КТ:  $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ .

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждались на: 10-й, 11-й и 12-й Международных конференциях "Авиация и космонавтика - 2011, 2012, 2013", МАИ (НИУ), г. Москва, на XIX-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, РКК "Энергия" им. С.П. Королева, г. Королев, на IV и V Общероссийской молодежной научно-технической конференции "Молодежь. Техника. Космос", БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, на Восьмой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2013", Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, г. Иваново.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 5 в журналах и изданиях, имеющих аккредитацию ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых источников из 79 наименований, приложения на 7 страницах, изложена на 139 страницах машинописного текста, включающего 79 иллюстраций и 14 таблиц.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель работы и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор литературных источников, посвященных исследованиям завесного охлаждения применительно к КС жидкостных ракетных двигателей (ЖРД).

Изучению газовых завес посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Основным параметром, определяющим интенсивность теплообмена является так называемая **тепловая эффективность газовой завесы**, под которой подразумевается способность завесы предотвращать нагрев стенки КС выше максимальной рабочей температуры материала:

$$\theta = \frac{T_{\text{ст.бз}}(x) - T_{\text{ст.з}}(x)}{T_{\text{ст.бз}}(x) - T_3} \quad (1)$$

где  $T_{\text{ст.бз}}(x)$  и  $T_{\text{ст.з}}(x)$  - температура стенки без завесного охлаждения и при его наличии;  $T_3$  - температура компонента, подаваемого в завесу;  $x$  - текущая координата.

Согласно экспериментальным данным эффективность завесного охлаждения зависит от целого ряда факторов. К числу основных следует отнести:

### 1) **конструктивное исполнение системы охлаждения и способ подачи охладителя:**

- ✓ *толщина стенки над щелью  $h$*  - эффективность завесы существенно зависит от величины отношения толщины стенки над щелью к высоте щели  $h/s$ . Чем меньше отношение  $h/s$ , тем выше эффективность завесного охлаждения. Это объясняется тем, что наличие сравнительного толстого козырька над щелью способствует дополнительной турбулизации потока за щелью.
- ✓ *расположение щелей завесы относительно форсунок* - наиболее выгодным является случай, когда щели завесы располагаются между форсунками.
- ✓ *угол выхода охладителя* - с увеличением угла подачи охладителя эффективность завесы уменьшается, достигая минимума при радиальном вдуве. Охладитель следует подавать вдоль стенки КС (угол выхода завесы равен 0).
- ✓ *тангенциальный или радиальный подвод охладителя* - более высокую эффективность охлаждения имеют закрученные завесы. Центробежная сила прижимает поток завесы к

стенке, препятствуя его преждевременному размытию продуктами сгорания основного потока.

**2) параметры совместного течения завесы и основного потока:**

✓ параметр вдува  $M$ , определяемый соотношением:

$$M = \frac{\rho_2 u_2}{\rho_\infty u_\infty} \quad (2)$$

где  $\rho_2$  и  $\rho_\infty$  - плотности охладителя и основного потока;  $u_2$  и  $u_\infty$  - скорости подачи охладителя и основного потока.

Чем больше величина  $M$ , тем выше эффективность завесного охлаждения.

**3) характеристики, относящиеся к завесе:**

✓ относительный массовый расход охладителя - чем больше расход компонента, идущего в завесу, тем выше эффективность охлаждения. Однако с учетом оценки экономичности изделия практический интерес представляют завесы со сравнительно небольшим относительным расходом  $\bar{m}_3 < 0.3$  ( $\bar{m}_3 = \dot{m}_3 / \dot{m}_2$ ).

✓ химический состав охладителя - использование химически нейтрального газа в качестве завесного охладителя (например, азота) позволяет избежать догорания окислителя на стенке КС. Однако, применение стороннего компонента возможно лишь при исследовании экспериментальных двигателей.

✓ уровень турбулентности охлаждающего газа - изменение интенсивности турбулентности охладителя в щели слабо влияет на эффективность завесного охлаждения;

✓ температура охладителя - чем ниже температура компонента, поступающего в завесу, тем выше эффективность охлаждения.

**4) характеристики рабочего процесса в КС:**

✓ давление в КС - не оказывает существенного влияния на эффективность охлаждения;

✓ интенсивность турбулентности основного потока - увеличение интенсивности турбулентности основного потока существенно уменьшает эффективность завесного охлаждения.

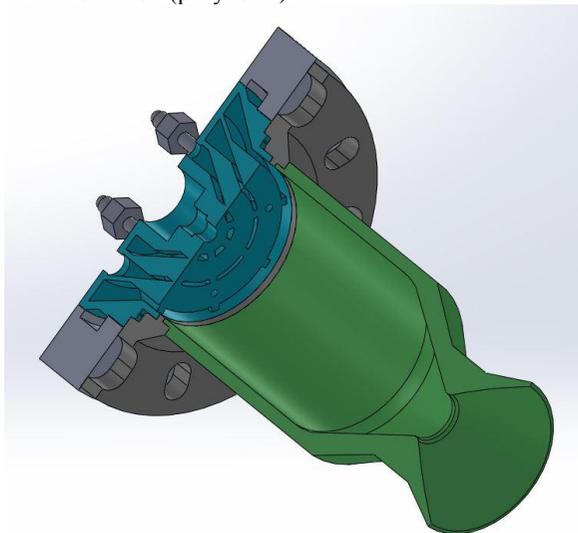
На основании рассмотренных работ сделан вывод о том, что характер течения при вдуве завесы в значительной мере определяется параметрами, связанными с выбором конкретного способа подачи охладителя, конструктивными и режимными факторами.

Наибольшее воздействие завеса охлаждения оказывает на конвективный тепловой поток. Для того чтобы рассчитать теплообмен между продуктами сгорания и стенками камеры, необходимо знать состав и температуру газа в пристеночном слое во всех сечениях камеры сгорания и сопла, которые, в свою очередь, определяются только соответствующими соотношениями компонентов. Поэтому для определения конвективного теплового потока необходимо найти расчетное соотношение  $k_{т\text{ расч}}$  вдоль стенки КС. Далее в главе рассмотрены инженерные методики, описывающие алгоритмы расчета соотношения КТ вдоль стенки КС. Наличие большого числа подобных алгоритмов связано в основном с отсутствием в настоящее время надежного метода расчета процесса турбулентного перемешивания завесы с основным потоком применительно к РДМТ. Основная причина отсутствия модели завесного охлаждения в РДМТ заключается в необходимости учета сложной совокупности взаимосвязанных термогазодинамических и физико-химических процессов в КС и сопле РДМТ, каждый из которых представляет собой самостоятельную весьма сложную задачу.

В главе показана возможность использования пакетов прикладных программ для расчета совместного течения завесы и основного потока, а также поставлена задача создания такой методики на основе численного моделирования внутрикамерных процессов в РДМТ с учетом завесного охлаждения.

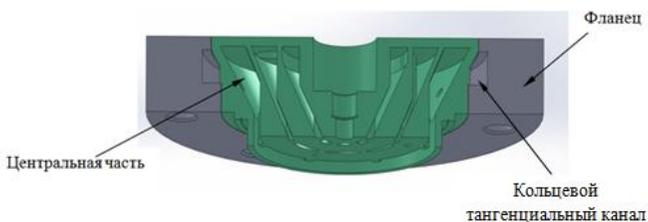
**Вторая глава** посвящена объекту исследования и описанию используемой математической модели внутрикамерных процессов в РДМТ с учетом внутреннего завесного охлаждения.

Объектом исследования является специально разработанный экспериментальный РДМТ тягой 200 Н (в пустоте), работающий на несамовоспламеняющихся экологически чистых газообразных КТ:  $\text{CH}_4 + \text{O}_2$  (рисунок 1).



*Рисунок 1. Модель экспериментального РДМТ*

Смесеобразование организуется в, так называемой, щелевой смесительной головке (рисунок 2). Она представляет собой сборку, состоящую из кольцевого коллектора и центральной части. Подвод компонентов осуществляется через кольцевые каналы, расположенные в центральной части и разделенные перегородками на 8 секторов.



*Рисунок 2. Щелевая смесительная головка*

Особенностью данной смесительной головки является то, что она выполнена с использованием современных аддитивных технологий. Центральная часть изготавливается по 3D модели, представленной на рисунке 3, путем "выращивания" из металлического порошка нержавеющей стали марки CP1 (аналог 12X18H10T) на аддитивном станке EOSINT M270 фирмы EOS. Данная установка предназначена для изготовления деталей из легких и сверхтвердых сплавов, стали, композитов и использует технологию спекания металлического порошка лазерным лучом.

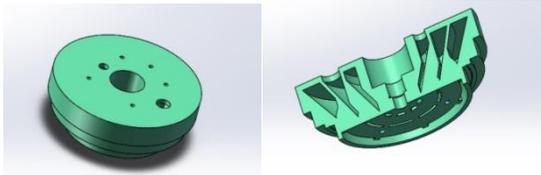


Рисунок 3.3D модель центральной части смесительной головки

На смесительной головке предусмотрена система воспламенения с электроискровым источником зажигания. Подача компонента отдельно на свечу отсутствует, зажигание происходит при попадании компонентов из КС в полость перед свечой зажигания.

Охлаждение стенок КС осуществляется только при помощи завесы одним из КТ без использования дополнительного регенеративного охлаждения, что приближает исследование к реальным условиям эксплуатации двигателя. Для подачи завесного охладителя используется отдельный кольцевой тангенциальный канал, проточенный во фланце смесительной головки (рисунок 2) и позволяющий менять расход и вид охладителя в зависимости от задач исследования.

Сборка смесительной головки происходит путем сочленения центральной части головки и фланца. Две детали свариваются аргодуговой сваркой, после чего к головке привариваются штуцера подвода компонентов и штуцера термомпар. Смесительная головка приведена на рисунке 4.

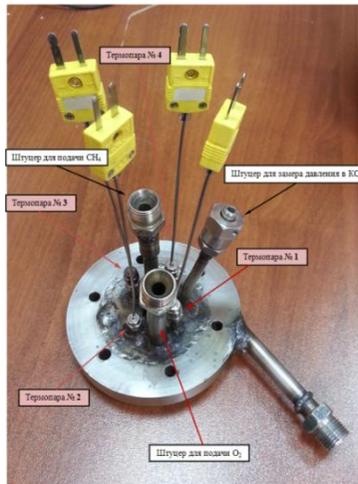


Рисунок 4. Смесительная головка

Для стендовых испытаний в атмосферных условиях используется КС с укороченным соплом со степенью расширения по площадям  $\bar{F} = 9.5$ , что позволяет избежать режима перерасширения, а также проникновения скачка уплотнения в сопло.

Течения в смесительной головке и КС РДМТ отличаются высокой сложностью. Это связано с наличием в потоке областей с различными числами Маха, возвратных течений, а также зон взаимодействия основного потока с пристеночным слоем и стенкой КС.

Для описания подобных течений в работе используются методы вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics (CFD)), основанные на численном решении

пространственных и нестационарных уравнений Навье-Стокса и реализованные в программном комплексе ANSYS CFX.

**Полная система уравнений Навье-Стокса**, описывающая течение смеси, в векторной форме имеет следующий вид:

**1. Уравнение неразрывности (уравнение сохранения массы):**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3)$$

где

$\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  - время, с;

$U = (U_x; U_y; U_z)$  - вектор скорости  $U$  в декартовых координатах, м/с;

$\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}$  - векторный дифференциальный оператор "набла".

**2. Уравнение сохранения импульса:**

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (4)$$

где тензор напряжений  $\tau$  связан со скоростью деформации по:

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U) \quad (5)$$

где

$p$  - статическое (термодинамическое) давление, Па;

$\mu$  - коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$\delta$  - символ Кронекера;

$S_M$  - источниковый член (источник импульса, связанный с массовыми силами), кг/м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>;

$$S_M = J\rho \quad (6)$$

$J$  - результирующий вектор массовых сил, Н/кг;

$T$  - в данном случае означает транспонирование тензора  $(\nabla U)$ ;

$\otimes$  - тензорное умножение векторов.

**3. Уравнение сохранения полной энергии:**

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (7)$$

где

$h_{tot}$  - полная энтальпия, связанная со статической энтальпией  $h(T, p)$  следующим соотношением:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2 \quad (8)$$

где

$\frac{1}{2}U^2$  - кинематическая составляющая;

$h = \sum_{m=1}^N h_m Y_m$  - энтальпия смеси, являющаяся аддитивной суммой удельных энтальпий индивидуальных веществ с учетом концентраций этих веществ в смеси:

$$h_m = h_m^0 + \int_{T_0}^T C_{p_m}(T) dT \quad (9)$$

где  $h_m^0$  и  $C_{p_m}(T)$  - энтальпия образования и теплоемкость при постоянном давлении  $m$ -ого компонента;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$S_E$  - источниковый член, отвечающий за приток (отток) энергии в процессе химического реагирования, излучения или каких-либо других процессах.

Член  $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$  представляет собой работу вязкостных сил.

Член  $U \cdot S_M$  представляет собой работу внешних источников.

#### 4. Уравнения переноса компонентов потока, записанные для массовых долей:

$$\frac{\partial \rho f_i}{\partial t} + \nabla(\rho U \cdot f_i) = \nabla(\rho D_i \cdot \nabla f_i) \quad (10)$$

где

$D_i$  - коэффициент молекулярной диффузии  $i$ -ого компонента, м<sup>2</sup>/с;

$f_i$  - массовая доля компонента смеси.

Коэффициент диффузии  $D$  для массы записывается как соотношение кинематической вязкости  $\nu$  и числа Шмидта

$$D = \frac{\nu}{Sc} \quad (11)$$

Для замыкания системы уравнений используется уравнение состояния:

$$p = \rho RT \quad (12)$$

Таким образом, система уравнений Навье-Стокса включает в себя уравнения неразрывности, движения, энергии и диффузии. Если в потоке происходят химические реакции, то вводятся уравнения модели протекания данных реакций.

Аналитическое решение данных уравнений невозможно, в частности, в случае турбулентных течений из-за их нестационарного и случайного характера, поэтому в инженерных расчетах используется подход, предложенный О. Рейнольдсом, в котором мгновенные значения параметров потока представляются в виде суммы осредненной величины и ее пульсационной составляющей. Турбулентное течение рассматривается, как некий случайный процесс, и к нему применимы приемы, используемые в теории вероятности и математической статистики. Для решения осредненных уравнений приходится привлекать дополнительную информацию (модели турбулентности), которую получают путем анализа результатов эксперимента.

**В третьей главе** приводится реализация численного эксперимента в ANSYS CFX, а также результаты расчетно-теоретического исследования.

На начальном этапе для численного исследования рабочих процессов в РДМТ использовалась секторная расчетная область, представляющая собой 1/8 часть полноразмерной КС (сектор 45° - по количеству щелей подачи КТ - 8 шт) (рисунок 5).

В ходе расчетов было проведено исследование чувствительности решения по отношению к сеточной дискретизации: размеру, распределению и количеству элементов для различных моделей горения (модели диссипации вихря Eddy Dissipation Model и модели тонкого фронта пламени The Flamelet Model) и различных моделей турбулентности (модель турбулентности типа  $k$ - $\epsilon$  и модель SST Ментера) (рисунок 6).

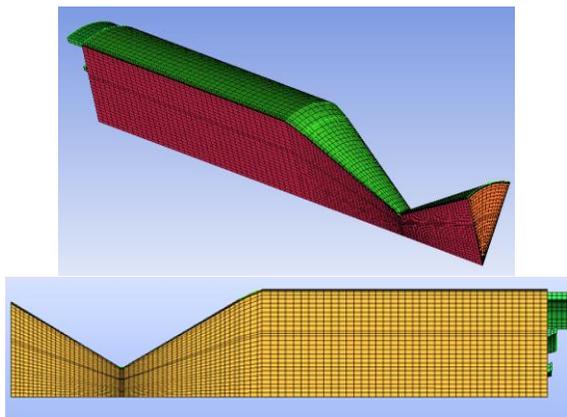


Рисунок 5. Расчетная область и сетка для моделирования рабочих процессов в РДМТ

В соответствии с проведенными вычислениями сходимость решения по давлению в КС достигается при количестве элементов 300 000.

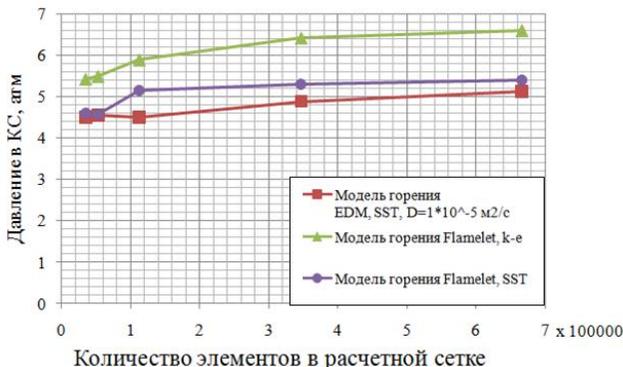


Рисунок 6. Давление в КС в зависимости от количества элементов в расчетной сетке

После получения независящего от сетки решения (расчетные значения не изменялись при дальнейшем измельчении сетки) исследование проводилось в несколько этапов.

### 1. Моделирование на секторной расчетной области

Целью первого этапа численного моделирования стало изучение влияния способа

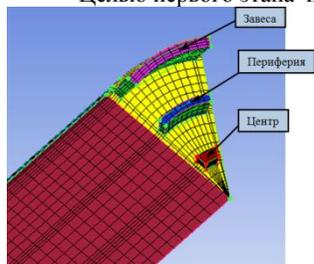


Рисунок 7. Схема подачи КТ

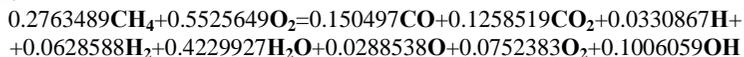
подачи КТ на эффективность и тепловое состояние РДМТ. Для этого использовалось четыре варианта подачи КТ в КС (рисунок 7):

- 1: в завесу-кислород, в центр-метан, в периферию-кислород.
- 2: в завесу-кислород, в центр-кислород, в периферию-метан.
- 3: в завесу-метан, в центр-метан, в периферию-кислород.
- 4: в завесу-метан, в центр-кислород, в периферию-метан.

Для каждого из способа подачи КТ требуется определить оптимальные параметры системы смесеобразования РДМТ (относительный расход охладителя  $\dot{m}_3$ , коэффициент избытка окислителя смеси, подаваемой в ядро потока  $\alpha_{я}$ , и

суммарный расход КТ через КС  $\dot{m}_\Sigma$ ) по критериям минимальной температуры стенки и максимального удельного импульса. Т. к. подавляющее большинство материалов стенки допускают весьма умеренные нагревы (максимум 1300÷1500 К), то в расчетах принималось ограничение для температуры стенки КС в 1400 К. Для определения регрессионных зависимостей  $I_{уд}$  и  $T_{ст}$  от входных параметров, построения поверхности отклика и минимизации числа вычислительных экспериментов для каждого из четырех вариантов подачи КТ был выбран центральный расширенный композиционный рототабельный план, по которому были выбраны расчетные точки согласно с уровнями варьирования:  $\bar{m}_3=0,1...0,75$ ;  $\alpha_n=0,001...3$ ;  $\dot{m}_\Sigma=57,6...70,4$  г/с. Центральная точка плана:  $\bar{m}_3=0,2$ ;  $\alpha_n=0,75$ ;  $\dot{m}_\Sigma=64$  г/с. Общее количество расчетных точек для каждого варианта составило 30. В каждой расчетной точке проводилось моделирование внутрикамерных процессов в РДМТ. При моделировании процессов горения и перемешивания в КС РДМТ приняты следующие допущения:

- Расчет проводится в условиях отсутствия силы тяжести.
- Задача рассматривается в стационарной постановке.
- В качестве рабочего тела используется реагирующая смесь, включающая в себя три вещества: "окислитель", "горючее" и "продукты сгорания", которые являются идеальными газами с постоянной вязкостью и теплоемкостью, зависящей от температуры.
- Химические реакции в КС РДМТ происходят с бесконечно большой скоростью. Весь каскад реакций, происходящих при горении, завершается за очень малое время (менее 1 мкс).
- Стенки адиабатические.
- В качестве модели турбулентности применяется модель переноса касательных напряжений Менера (*SST*).
- В качестве модели горения используется модель диссипации вихря (The Eddy Dissipation model). Состав продуктов сгорания определяется брутто-реакцией, выведенной из допущения о том, что в каждом элементарном объеме КС горючее и окислитель прореагировали до состояния полного расходования одного из КТ и образования равновесного состава ПС. В случае, если в элементарном объеме горючее и окислитель находятся не в стехиометрическом соотношении, то непрореагировавший КТ домешивается в ПС, уменьшая температуру смеси. Горение происходит по одной брутто-реакции:



Далее по результатам моделирования были получены регрессионные зависимости и построены поверхности отклика. Полученные зависимости представляют собой регрессионную модель проектных параметров РДМТ. На рисунках 8- 11 приведены графики функций  $I_{уд}$  и  $T_{ст}$  в зависимости от коэффициента избытка окислителя при различных расходах охлаждающего компонента (кислорода или метана), суммарном массовом расходе КТ 64 г/с и степени расширения сопла по площадям  $\bar{F}=9.5$ .

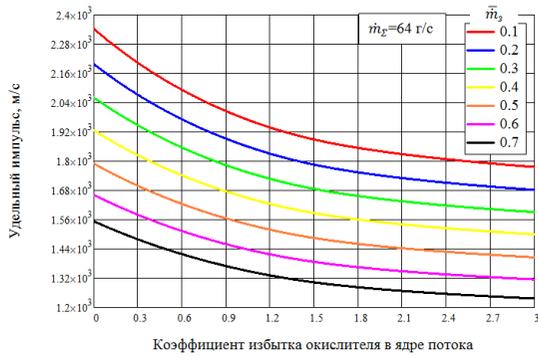


Рисунок 8. Расчетный удельный импульс при подаче кислорода в завесу и периферию

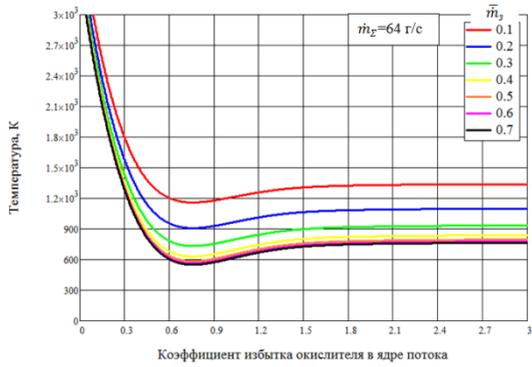


Рисунок 9. Температура стенки со стороны горячего газа при подаче кислорода в завесу и периферию

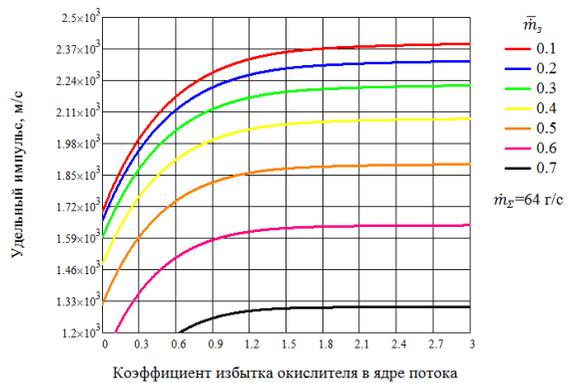


Рисунок 10. Расчетный удельный импульс при подаче метана в завесу и периферию

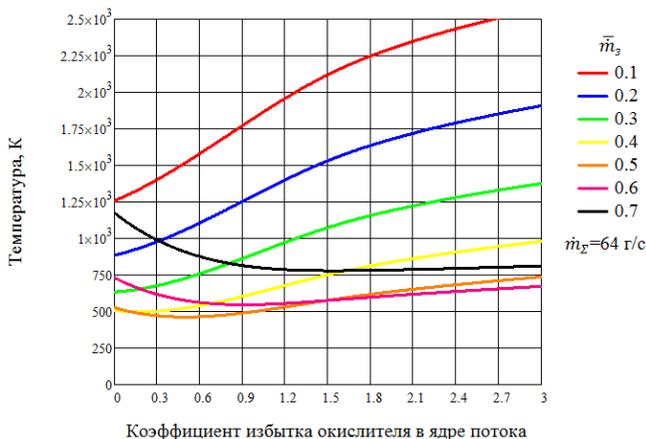


Рисунок 11. Температура стенки со стороны горячего газа при подачи метана в завесу и периферию

По полученным зависимостям поверхностей отклика с помощью многокритериального генетического алгоритма, были выявлены наиболее оптимальные по заданным критериям значения  $\alpha_{я}$ ,  $\bar{m}_3$ ,  $\dot{m}_3$ . Результаты оптимизационного расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оптимизационного расчета

| Способ подачи КТ | $\dot{m}_3$ , г/с | $\bar{m}_3$ | $\alpha_{я}$ | $\alpha_{\Sigma}$ | $p_{к}$ , атм | $I_{уд}$ , м/с | $T_{ст,max}$ , К | Ожидаемый $I_{уд}^p$ , м/с с полноразмерным соплом |
|------------------|-------------------|-------------|--------------|-------------------|---------------|----------------|------------------|----------------------------------------------------|
| Вариант 1        | 59,14             | 0,176       | 0,49616      | 0,656             | 6,425         | 2101           | 1115             | 3126                                               |
| Вариант 2        | 60,99             | 0,269       | 2,9695       | 4,155             | 7,047         | 1640           | 1997             | 2179                                               |
| Вариант 3        | 66,81             | 0,443       | 2,3182       | 0,253             | 7,691         | 2214           | 1199             | 2624                                               |
| Вариант 4        | 66,03             | 0,216       | 1,2073       | 0,464             | 9,055         | 2301           | 1326             | 3450                                               |

Таким образом, лучшими, с точки зрения достижения максимального  $I_{уд}$  при ограничении температуры стенки до 1400 К, являются способы подачи, когда в завесу подается метан (вариант 3 и вариант 4). Это связано с тем, что метан обладает большей охлаждающей способностью, чем кислород ( $K_{CH_4} = 596 \frac{кз^{0,2} \cdot м^{0,6}}{с^{2,2} \cdot К}$ ,  $K_{O_2} = 366 \frac{кз^{0,2} \cdot м^{0,6}}{с^{2,2} \cdot К}$ ).

Абсолютное значение удельного импульса больше у варианта 4, который и является наиболее оптимальным. Интересным является также вариант 1, т.к. при меньшем всего на 10% удельном импульсе, он обеспечивает наименьшую максимальную температуру стенки и наименьшее из всех вариантов давление в КС. Столь низкая максимальная температура стенки КС (1115 К) объясняется сравнительно небольшим давлением и, следовательно, меньшим тепловым потоком в стенку КС от продуктов сгорания топлива, который, как известно, зависит от давления:

$$q \sim p_k^{0,85} \quad (13)$$

Меньший тепловой поток в стенку означает большую надежность и ресурс в полете. Кроме этого, плотность топлива варианта 1 больше остальных (вариантов 3 и 4), т.к.  $\alpha_{\Sigma} = 0,65$ , и это значит, что для хранения компонентов на борту КЛА потребуются меньшие емкости. Все выше сказанное говорит о том, что с точки зрения проектирования РДМТ вариант 1

является более предпочтительным по сравнению с другими, даже несмотря на меньшие значения основного критерия оптимизации - удельного импульса. Единственным недостатком варианта 1, который практически перечеркивает все перечисленные достоинства является то, что завесное охлаждение стенки КС осуществляется окислителем - кислородом. Для сохранения стенки потребует применение специальных дорогостоящих жаростойких и материалов и технологий их нанесения.

Таким образом, было определено, что наиболее оптимальной схемой подачи КТ по критериям максимального  $I_{y0}$  при ограничении температуры стенки до 1400 К является вариант, при котором в качестве КТ для завесного охлаждения используется газообразный метан, а в ядро потока подается газообразный кислород. При данной схеме подачи и степени расширения сопла по площадям  $\bar{F}=9.5$ :  $I_{y0}=2301$  м/с, а  $T_{ст\_макс}=1326$  К (для полноразмерного сопла значение ожидаемого  $I_{y0\_ид}^n=3450$  м/с).

В ходе исследования внутрикамерных процессов в РДМТ было проведено сравнение данных, полученных экспериментальным и расчетным путем. Вычисленные значения давления в КС оказались меньше, чем полученные в ходе огневых запусков, что свидетельствует о необходимости настройки используемой математической модели.

Верификация кратковременными огневыми запусками позволила уточнить в выбранных моделях турбулентности и горения значения эмпирических коэффициентов: значение интенсивности турбулентности потоков КТ, подаваемых в КС, составляет  $I \approx 0.5$ , значение коэффициента диффузии, входящего в уравнение переноса компонентов (10),  $D \approx 0,017 \div 0,034$  м<sup>2</sup>/с.

Для  $D = 0,025$  м<sup>2</sup>/с расхождение в значениях экспериментального и расчетного давления составляет  $\sim 2\%$ , что свидетельствует о хорошем согласовании натуральных и численных экспериментов (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение численного и экспериментального давления в КС

| Номер запуска | $\dot{m}_Г$ , г/с | $\dot{m}_з$ , г/с | $\bar{m}_з$ | $\dot{m}_{O_2}$ , г/с | $\dot{m}_{CH_4}$ , г/с | $\alpha_{ядро}$ | $\alpha_{КС}$ | $P_{к\_эксп}$ , атм | $P_{к\_расч}$ , атм | Ошибка, % |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------|-----------------------|------------------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------------|-----------|
| 1             | 71,42             | 45,6              | 0,6386      | 16,89                 | 8,92                   | 0,4745          | 1,756         | 7,638               | 7,495               | 1,87      |
| 2             | 69,95             | 44,34             | 0,6338      | 16,39                 | 9,22                   | 0,4455          | 1,6508        | 7,514               | 7,483               | 0,4       |
| 3             | 63,36             | 36,67             | 0,5787      | 16,78                 | 9,91                   | 0,4244          | 1,3518        | 7,065               | 7,198               | 1,88      |
| 4             | 62,92             | 36,43             | 0,5789      | 16,71                 | 9,78                   | 0,4282          | 1,3617        | 7,035               | 7,136               | 1,44      |

## 2. Моделирование на полноразмерной КС с учетом распределения КТ по смесительной головке

Моделирование в секторной расчетной области производилось без учета характера ввода КТ в КС (компоненты подавались по нормали к сечению КС). Для изучения влияния распределения компонентов по смесительной головке на эффективность и тепловое состояние двигателя использовалась расчетная область полноразмерной КС (рисунок 12), которая включает внутреннюю геометрию каналов окислителя, горючего и компонента, идущего на завесное охлаждение. Применение такой расчетной области позволяет получить качественную картину наличия зон перегрева огневого днища и стенок КС. Поэтому следующим этапом исследования был расчет течения на полноразмерной КС с использованием различных моделей горения:

- Модель диссипации вихря (The Eddy Dissipation model);
- Модель тонкого фронта пламени (The Flamelet Model).

В качестве граничных условий на входе в расчетную область задавались массовые расходы КТ и расход на завесное охлаждение. На выходе - давление, полученное из одномерного термодинамического расчета. Для обеих моделей горения применяется SST-

модель турбулентности. Расчеты проводились для следующего способа подачи: в центр - метан, в периферию - кислород, в завесу - кислород.

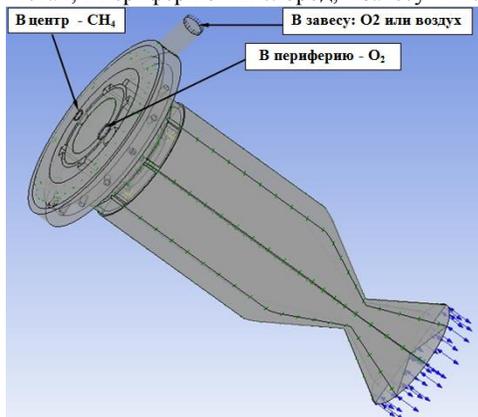


Рисунок 12. Расчетная область для учета распределения КТ по смесительной головке

Результаты расчетов показывают, что использование подхода к моделированию горения, основанного на модели тонкого фронта пламени (The Flamelet Model) не требует корректировки эмпирических коэффициентов, входящих в уравнения турбулентности и горения, и хорошо описывает процесс горения в РДМТ. Результаты моделирования с использованием подхода рассеивания вихря (The Eddy Dissipation model) существенно зависят от таких параметров, как коэффициент диффузии и интенсивность турбулентности потоков, подаваемых в КС. При соответствующей их корректировке обе модели показывают хорошую согласованность с экспериментом (таблица 3).

Таблица 3. Сравнение численного и экспериментального давления в КС для различных моделей горения

| № | $\dot{m}_{\Sigma}$ , г/с | $\bar{m}_3$ | $\alpha_{\text{ядро}}$ | $p_{\text{к, расч}}$ , атм |          | $p_{\text{к, эксп}}$ , атм | Ошибка, % |          |
|---|--------------------------|-------------|------------------------|----------------------------|----------|----------------------------|-----------|----------|
|   |                          |             |                        | EDM                        | Flamelet |                            | EDM       | Flamelet |
| 1 | 71,42                    | 0,6386      | 0,4745                 | 7,387                      | 7,474    | 7,638                      | 3,28      | 2,15     |
| 2 | 69,95                    | 0,6338      | 0,4455                 | 7,342                      | 7,421    | 7,514                      | 2,3       | 1,24     |
| 3 | 63,36                    | 0,5787      | 0,4244                 | 7,011                      | 7,121    | 7,065                      | 0,76      | 0,8      |
| 4 | 62,92                    | 0,5789      | 0,4282                 | 6,935                      | 7,118    | 7,035                      | 1,42      | 1,18     |

Таким образом, для моделирования процесса турбулентного горения в РДМТ возможно использование двух подходов: модели диссипации вихря (The Eddy Dissipation model) и модели тонкого фронта пламени (The Flamelet Model).

Однако, использование Flamelet модели осложняется тем, что в настоящее время флеймлет-библиотеки существуют лишь для ограниченного числа топливных пар. Это делает невозможным использование данного подхода для моделирования горения таких широко используемых в ракетной промышленности топлив как НДМГ+АТ, ММГ+АТ, керосин+ВРВ и т.д. Модель тонкого фронта пламени также не применима в случае, когда в качестве завесного охладителя используется сторонний компонент, не входящий в пару КТ (например, когда в ядро потока подаются метан и кислород, а в качестве завесного охладителя используется воздух). Модель рассеивания вихря, в свою очередь, не имеет таких ограничений и может быть использована для решения широкого круга задач моделирования горения.

**В четвертой главе** описан огневой экспериментальный стенд, дается описание последовательности проведения экспериментов, а также представлены основные результаты огневых запусков разработанного двигателя. Приводятся рекомендации и предложения по организации газозавесного охлаждения и расчету РДМТ на ранних этапах проектирования.

Все экспериментальные исследования и огневые испытания разработанного двигателя проводились на испытательном стенде на кафедре «Ракетные двигатели» факультета «Двигатели летательных аппаратов» МАИ (НИУ).

Основными системами стенда являются:

- система хранения и подачи КТ;
- автоматизированная система управления;
- система измерения, регистрации и автоматизированной обработки экспериментальных данных;
- система видеотрансляции и видеорегистрации;
- система водоснабжения и пожаротушения;
- приточно-вытяжная вентиляция.

Основными особенностями работы стенда являются:

- 1) проведение огневых испытаний в условиях атмосферы;
- 2) возможность работы на длительных и импульсных режимах;
- 3) использование только экологически чистых КТ;
- 4) возможность регулирования расходов КТ и расхода компонента, идущего на внутреннее завесное охлаждение.

Экспериментальное исследование энергетических характеристик и теплового состояния РДМТ проводилось на различных режимах работы. Можно выделить 3 основных этапа экспериментов: кратковременные огневые испытания на металлической КС с кислородной завесой; огневые испытания на металлической КС с воздушной завесой и огневые испытания на композитной КС с воздушной завесой и выходом двигателя на стационарный режим работы.

**На начальном этапе** проведена серия кратковременных огневых запусков продолжительностью 2-3 с. Использовалась следующая схема подачи компонентов: в центр - метан, в периферию - кислород, в завесу - кислород.

После проведения серии экспериментов было выявлено, что наибольшему температурному воздействию подверглось огневое днище смесительной головки. На металле видна картина цветов побежалости, подтверждающая наличие высокотемпературных обратных токов и зон повышенных температур вблизи огневого днища.

Первый этап кратковременных огневых запусков позволил верифицировать математическую модель и уточнить значения эмпирических коэффициентов (интенсивность турбулентности и коэффициент диффузии), входящих в уравнения модели турбулентности и горения.

**Вторым этапом** экспериментов стало исследование теплового состояния конструкции РДМТ с использованием в качестве завесного охладителя воздуха, как обещающего более низкие температуры стенки и огневого днища и позволяющего провести более длительные эксперименты (температура горения метана и воздуха при  $p_k=1$  МПа и  $\alpha=1$  составляет 2267 К). Продолжительность огневых запусков составила 5-15 сек. Использовалась следующая схема подачи компонентов: в центр - метан, в периферию - кислород, в завесу - воздух.

Использование воздушной завесы позволило снизить температуру огневого днища при работе на "жестком режиме" по соотношению КТ в ядре потока и увеличить длительность огневого запуска. В таблице 4 приведено сравнение температур огневого днища для кислородной и воздушной завесы.

Таблица 4. Сравнение температур огневого днища для кислородной и воздушной завесы

| Завеса      | $t$ ,<br>с | $\alpha_{\text{ядро}}$ | $\bar{m}_3$ | $T_{\text{од}} \text{ №1,}$<br>К | $T_{\text{од}} \text{ № 2,}$<br>К | $T_{\text{од}} \text{ № 3,}$<br>К | $T_{\text{од}} \text{ № 4,}$<br>К |
|-------------|------------|------------------------|-------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Кислородная | 3          | 1,01                   | 0,7437      | 1200                             | 850                               | 838                               | 818                               |
| Воздушная   | 5          | 1,07                   | 0,744       | 849                              | 854                               | 658                               | 881                               |

Для оценки энергетической эффективности РДМТ использовался расходный комплекс  $\beta$ :

$$\beta = \frac{p_k \cdot F_{\text{кр}}}{\dot{m}_\gamma} \quad (14)$$

На рисунке 13 представлены экспериментальные результаты по определению энергетической эффективности РДМТ с металлической КС для кислородной и воздушной завесы.

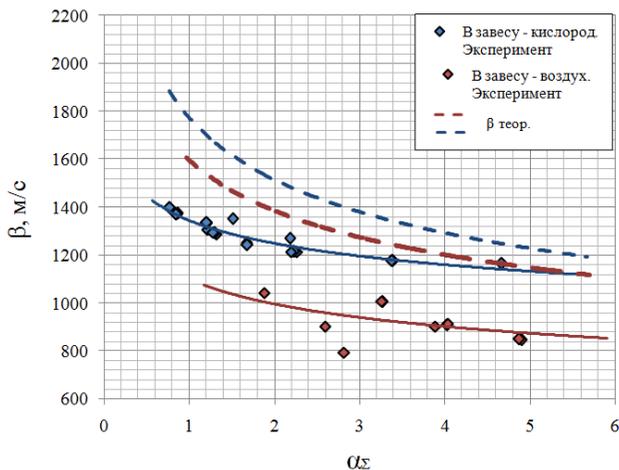


Рисунок 13. Зависимость расходного комплекса  $\beta$  от суммарного коэффициента избытка окислителя в КС на различных режимах

При подаче в завесу кислорода в исследуемом диапазоне изменения  $\alpha_\Sigma$  наблюдается увеличение расходного комплекса  $\beta$  по сравнению с подачей в завесу воздуха.

Таким образом, использование воздушной завесы обеспечивает менее теплонпряженный режим работы конструкции РДМТ, но в то же время существенно снижает эффективность работы двигателя ( $\approx$  на 20 %) по сравнению с кислородной.

На третьем этапе экспериментов для обеспечения выхода двигателя на стационарный режим работы по температуре стенки и определения необходимого расхода охладителя для надежной защиты стенок КС было принято решение провести огневые запуски на КС, изготовленной из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ). Теплостойкость такого материала допускает нагрев стенки до температуры  $\approx 2000$  К, что позволяет провести исследования в широком диапазоне варьирования  $\bar{m}_3$ .

Для оценки теплового состояния конструкции во время проведения огневых запусков использовалась тепловизионная камера. Испытания показали существенную неравномерность распределения завесного охладителя для  $\bar{m}_3 > 0.48$ , которая подтверждается снимками, сделанными во время экспериментов (рисунок 14).

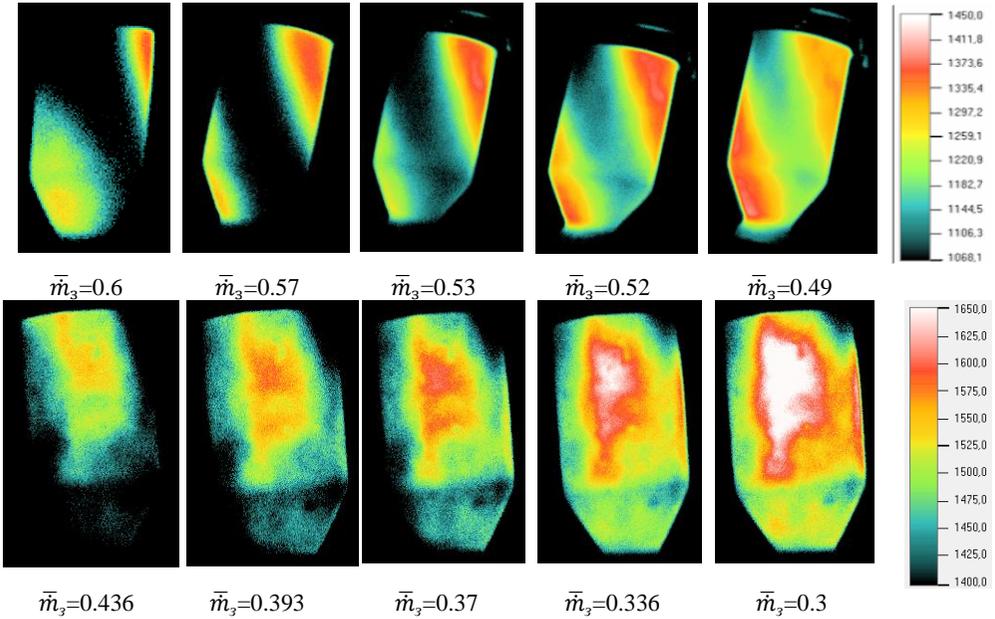


Рисунок 14. Термограмма стенки КС, сделанная во время запусков (в К)

Для стационарного режима работы двигателя получена зависимость максимальной температуры стенки КС и огневого днища от относительного расхода на завесу (рисунок 15). С увеличением расхода на завесное охлаждение температура стенки снижается.

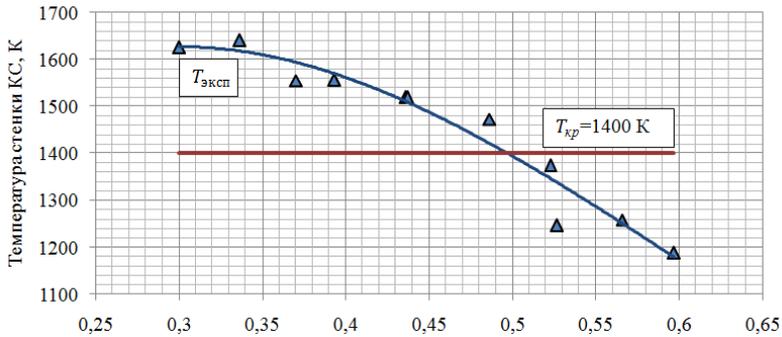


Рисунок 15. Зависимость максимальной температуры стенки КС от относительного расхода на завесное охлаждение

Для надежного охлаждения стенок КС расход газообразного воздуха должен составлять не менее 50 % от суммарного расхода КТ.

Т. к. разработанный двигатель испытывался на разных режимах с использованием различных компонентов в качестве завесного охладителя, то для оценки полноты преобразования КТ в КС двигателя в ПС, использовалась зависимость коэффициента расходного комплекса  $\varphi_p$  от суммарного коэффициента избытка окислителя в КС (рисунок 16).

$\varphi_{\beta}$  определяется как:

$$\varphi_{\beta} = \frac{\beta}{\beta_{\tau}} \quad (15)$$

где  $\beta$  - расходный комплекс камеры РДМТ;  $\beta_{\tau}$  - теоретический расходный комплекс, зависящий от конкретного вида топлива.

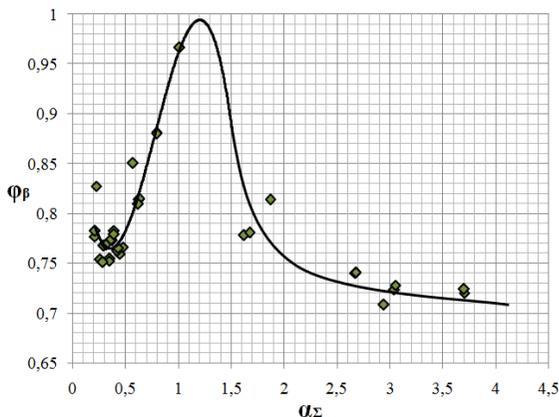


Рисунок 16. Зависимость коэффициента расходного комплекса  $\varphi_{\beta}$  от суммарного коэффициента избытка окислителя в КС на различных режимах

Максимальное значение  $\varphi_{\beta}$ , полученное в ходе экспериментального исследования РДМТ составило 0,96. Однако, достижение такого высокого значения  $\varphi_{\beta}$  осложняется необходимостью обеспечения допустимого температурного режима. Время запуска для данного эксперимента составило лишь 3 сек.

Для оценки применимости разработанной математической модели проведено количественное и качественное сравнение результатов численных и натуральных экспериментов. Сопоставление результатов моделирования с данными эксперимента выполнено для конкретных огневых запусков с выходом двигателя на стационарный режим работы по температуре стенки (таблица 5). Сравнение проводилось при моделировании полноразмерной КС для следующей схемы подачи КТ: в центр - метан, в периферию - кислород, в завесу - воздух. Для описания процесса горения в РДМТ использовалась модель рассеивания вихря (The Eddy Dissipation Model). Для данных КТ и компонента, используемого для охлаждения КС, горение происходит по следующей брутто-реакции:

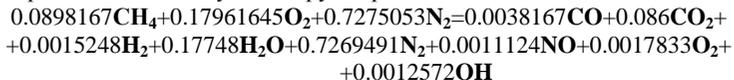


Таблица 5. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик РДМТ

| № | t, с | $\dot{m}_{\Sigma}$ , г/с | $\dot{m}_3$ | $\alpha_{\text{ядро}}$ | $p_{\text{к}}$ , атм |       | Расхождение по $p_{\text{к}}$ , % | $T_{\text{ог.ст.}}^{\text{max}}$ , К |      | Расхождение по $T_{\text{ог.ст.}}^{\text{max}}$ , % |
|---|------|--------------------------|-------------|------------------------|----------------------|-------|-----------------------------------|--------------------------------------|------|-----------------------------------------------------|
|   |      |                          |             |                        | р                    | э     |                                   | р                                    | э    |                                                     |
| 1 | 40   | 50,9                     | 0,3363      | 1,33                   | 4,77                 | 4,54  | 5                                 | 1844                                 | 1640 | 12,4                                                |
| 2 | 40   | 53,95                    | 0,3702      | 1,38                   | 4,978                | 4,838 | 2,9                               | 1478                                 | 1555 | 5                                                   |
| 3 | 40   | 60,6                     | 0,437       | 1,55                   | 5,28                 | 5,421 | 2,6                               | 1334                                 | 1510 | 11,68                                               |
| 4 | 50   | 69,77                    | 0,5228      | 1,89                   | 5,7                  | 6     | 5                                 | 1297                                 | 1334 | 2,8                                                 |
| 5 | 45   | 72,05                    | 0,5968      | 1,86                   | 6,486                | 6,1   | 6,3                               | 1105                                 | 1175 | 6                                                   |

Расхождение результатов численного моделирования с экспериментальными данными по давлению в КС составляет  $\sim 6\%$ , а по температуре стенки -  $\sim 12\%$ , что свидетельствует об удовлетворительном согласовании расчетных и экспериментальных значений.

В ходе численного моделирования внутрикамерных процессов в РДМТ на режиме, когда в качестве завесного охладителя использовался газообразный кислород, обнаружены зоны повышенных температур вблизи огневого днища, наличие которых подтвердилось оплавлением кромок термопар и появлением цветов побежалости на металле смесительной головки (рисунок 17).

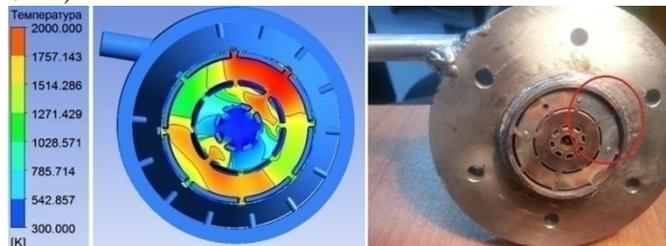


Рисунок 17. Распределение температуры огневого днища и состояние смесительной головки после испытаний (красным выделено пятно перегрева)

Моделирование горения в РДМТ указало на наличие зон перегрева стенки КС вблизи критического сечения. В ходе проведения экспериментов данные расчета подтвердились уносом материала в области критического сечения КС (рисунок 18).

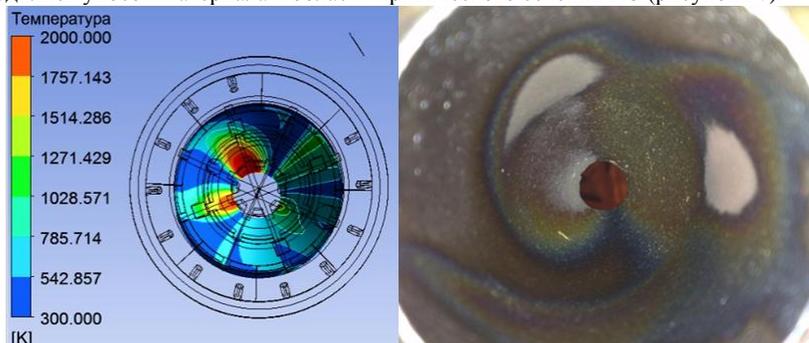


Рисунок 18. Распределение температуры на внутренней стенке КС и состояние КС после испытаний

Далее проводилось сравнение численных и экспериментальных данных по картинам распределения температур. Полученная в ходе численного исследования зона пониженной температуры, обусловленная течением завесы с  $\dot{m}_3 = 0.6$ , подтвердилась в ходе экспериментального исследования (на термограмме также присутствует полоса, соответствующая течению завесы) (рисунок 19).

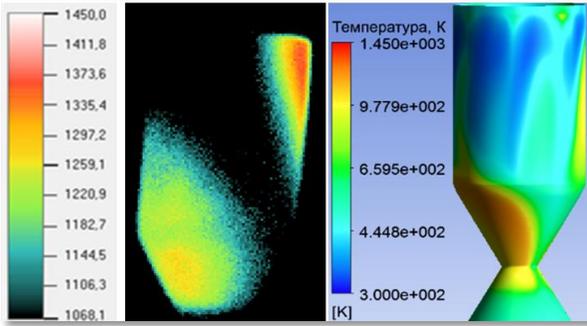


Рисунок 19. Термограмма КС и распределение температуры на внешней стенке КС.  $\bar{m}_3 = 0.6$

Местоположение зоны перегрева КС для  $\bar{m}_3 = 0.336$  также подтвердилось на термограмме, сделанной во время огневого запуска (рисунок 20).

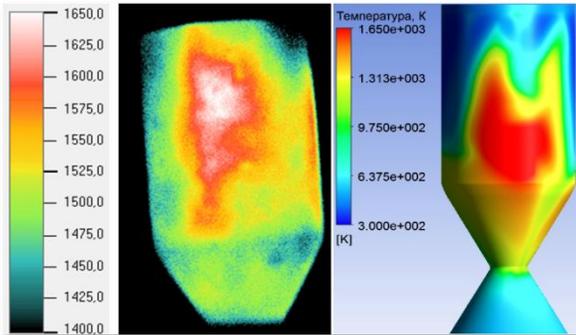


Рисунок 20. Термограмма КС и распределение температуры на внешней стенке КС.  $\bar{m}_3 = 0.336$

Повторяющиеся пятна перегрева на внутренней стенке КС также являются дополнительным характерным признаком удовлетворительного согласования результатов численного и натурального эксперимента (рисунок 21).

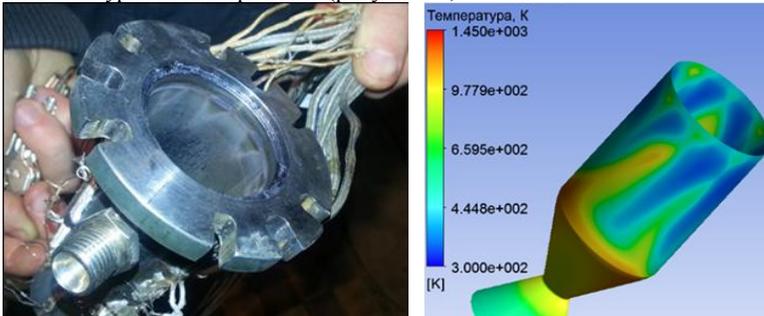


Рисунок 21. Пятна перегрева на внутренней стенке КС

Качественная оценка и количественный анализ указанных данных показывает, что в целом расчетные и экспериментальные результаты согласуются с удовлетворительной

точностью, достаточной для оценки интегральных параметров двигателя на стадии предварительных расчетов при проектировании РДМТ с внутренним газозавесным охлаждением.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа литературных источников даны следующие рекомендации по организации завесного охлаждения в РДМТ: параметр вдува  $M$  должен быть  $\sim 1$ ; щели завесы следует располагать между форсунками; охладитель следует подавать вдоль стенки камеры сгорания (угол выхода охладителя равен нулю); в случае наличия козырька отношение толщины стенки над щелью к высоте щели должно быть  $h/s \ll 1$ .

2. В работе предложена математическая модель рабочего процесса РДМТ с завесным охлаждением, основанная на численном решении уравнений Навье-Стокса. Основные рекомендации, относящиеся к методикам построения сеток и заданию граничных условий, могут быть применимы к задачам расчета РДМТ, работающих на газообразном кислородно-метановом топливе:

- В случае если конструкция смесительной головки обладает свойствами симметрии численное моделирование внутрикамерных процессов проводится в секторной расчетной области. Этот метод предварительного расчета позволяет получить интегральные характеристики РДМТ с минимальными затратами времени и вычислительных мощностей.
- Для более точного прогнозирования температурного состояния огневого днища и стенок КС рекомендуется использование полноразмерной расчетной области, которая включает в себя гидравлическую часть смесительной головки и расчетную сетку с "загущением" (с большим количеством ячеек) в пристеночных областях, где возможны зоны перегрева конструкции.
- Для численного моделирования теплового состояния РДМТ достаточной является сетка с  $y_{max}^+ = 5$ . Однако, если внутренняя геометрия позволяет сохранить качество расчетной сетки при уменьшении значения  $y_{max}^+$ , то рекомендуется использовать сетку с  $y_{max}^+ < 1$ .
- Для описания турбулентности рекомендуется модель SST со значением интенсивности турбулентности потоков КТ -  $I \approx 0.5$ .
- Для моделирования процесса турбулентного горения в РДМТ, работающего на газообразных компонентах топлива, рекомендуется использовать модель тонкого фронта пламени (The Flamelet Model). Однако, в случае, если использование данной модели невозможно (отсутствует флеймлет-библиотека для топливной пары КТ), рекомендуется использование модели диссипации вихря (The Eddy Dissipation model) со значением коэффициента кинематической диффузии КТ  $D \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ .

3. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными (расхождение составляет  $\sim 6\%$  по давлению в КС и  $\sim 12\%$  по температуре стенки). Разработанная методика моделирования позволяет: для данной конструкции смесительной головки определить наиболее оптимальные по критериям максимального  $I_{уд}$  и ограничении температуры стенки до 1400 К схемы подачи КТ, а также параметры смесеобразования: найти расходы на форсунки и в завесу.

4. Разработан и создан экспериментальный РДМТ, работающий на газообразных метане и кислороде. Проведены огневые испытания разработанного РДМТ с выходом двигателя на стационарный режим работы по температуре стенки с использованием только внутреннего завесного охлаждения. Определен потребный расход охладителя для надежной защиты стенок КС:  $\bar{m}_3 > 50\%$ .

### **Основные публикации по теме диссертационной работы:**

1. Хохлов А.Н., Богачева Д.Ю., Заранкевич И.А. Экспериментально-теоретическая модель для исследования эффективности завесного охлаждения с использованием методов планирования эксперимента // Материалы XIX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. 14-18 ноября 2011, Королев: РКК "Энергия" им. С.П.Королева, 2013, - с. 220-224.
2. Воробьев А.Г., Боровик И.Н., Хохлов А.Н., Богачева Д.Ю. Разработка экспериментально-расчетной системы исследования эффективности завесного охлаждения жидкостного ракетного двигателя малой тяги. [Электронный ресурс] // Электронный журнал "Труды МАИ", № 52 (5 апреля 2012 г).URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29479>.
1. Богачева Д.Ю., Боровик И.Н. Анализ факторов, влияющих на эффективность завесного охлаждения камеры сгорания ЖРДМТ // Молодежь. Техника. Космос: труды IV Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб.: БГТУ "ВОЕНМЕХ", 2012, с. 27-29.
4. Коватева Ю.С., Богачева Д.Ю. Оценка теплового состояния камеры сгорания ЖРДМТ, работающего на экологически чистых компонентах топлива. [Электронный ресурс] // Электронный журнал "Труды МАИ", № 65 (19 июня 2013 г).URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40191>.
5. Богачева Д.Ю., Прохоров А.В., Козлов А.А. Процесс сбора и анализа результатов испытаний ЖРДМТ // Математическое моделирование и информационные технологии // Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2013": Материалы конференции. В 7 т.Т. 5, Ч. 1. - Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина, 2013, - с. 6-9.
6. Богачева Д.Ю., Боровик И.Н. Математические модели для расчета соотношения компонентов топлива в пристеночном слое камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги. [Электронный ресурс] // Электронный журнал "Труды МАИ", № 73 (25 марта 2014 г).URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48483>.
7. Козлов А.А., Богачева Д.Ю., Боровик И.Н. Исследование тепловой эффективности завесного охлаждения стенки камеры сгорания ракетного двигателя малых тяг // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение", № 1 (94). - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, - с. 80-92.
8. Чудина Ю.С., Боровик И.Н., Козлов А.А., Богачева Д.Ю., Воробьев А.Г., Заранкевич И.А., Ташев В.П., Казеннов И.С. Экспериментальное исследование характеристик ЖРД тягой 500Н на топливе керосин-ВПВ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение", № 4 (97). - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, - с. 83-98.

### **Авторские свидетельства:**

9. Богачева Д. Ю., Боровик И. Н. Автоматическая обработка и анализ результатов огневого испытания жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614661 от 24 мая 2012 г.
10. Богачева Д.Ю., Коватева Ю.С. Математическая обработка и графическое отображение результатов огневых экспериментов при исследовании внутрикамерных процессов в жидкостном ракетном двигателе малой тяги, работающего на газообразных метане и кислороде. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615725 от 19июня 2013 г.