

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.125.08 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (МАИ)
МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБРНАУКИ РФ) ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25.12.2014г. № 22

о присуждении Богачевой Дарье Юрьевне, гражданке РФ ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Моделирование внутреннего (завесного) охлаждения ракетного двигателя малой тяги на экологически чистых газообразных компонентах топлива» по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» принята к защите 20.10.2014 протокол №16 диссертационным советом Д212.125.08 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ), 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, приказы Минобрнауки РФ: о создании диссертационного совета - № 2249-1460 от 02.11.2007 г., об изменении состава диссертационного совета - № 1986-540/1460 от 21.11.2008 г., о продлении срока действия диссертационного совета - № 1925-601 от 08.09.2009 г., о соответствии диссертационного совета Положению о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук - № 105/нк от 11.04.2012 г., об изменении

состава диссертационного совета - № 580/нк от 22.08.2012 г., об изменении состава диссертационного совета - № 548/нк от 06.10.2014 г.

Соискатель – Богачева Дарья Юрьевна, 1989 года рождения, работает младшим научным сотрудником в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ).

В 2011 году соискатель с отличием окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования ««Московский авиационный институт (государственный технический университет)» (МАИ) Федерального агентства по образованию, в 2014 году соискатель окончила обучение в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ).

Диссертация выполнена на кафедре «Ракетные двигатели» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ).

Научный руководитель – доктор технических наук, Козлов Александр Александрович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ), кафедра «Ракетные двигатели», профессор.

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", кафедра "Ракетные двигатели", заведующий кафедрой;

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

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Открытое акционерное общество «Военно-промышленная корпорация "Научно-производственное объединение машиностроения"» (ОАО ВПК "НПО машиностроения"), г. Реутов в своем положительном заключении, подписанном Точиловым Леонидом Сергеевичем, кандидатом физико-математических наук, ученым секретарем ОАО ВПК "НПО машиностроения"; Решом Георгием Фридриховичем, кандидатом технических наук, первым заместителем начальника отделения энергосиловых установок ОАО ВПК "НПО машиностроения"; Новиковым Андреем Евгеньевичем, кандидатом технических наук, заместителем начальника ЦКБМ - начальником отделения энергосиловых установок ОАО ВПК "НПО машиностроения"; утвержденном Гришко Михаилом Ивановичем, доктором технических наук, профессором, первым заместителем генерального директора ОАО ВПК "НПО машиностроения" указала, что диссертация соискателя ученой степени Богачевой Дарьи Юрьевны является законченной научно-квалификационной работой, посвященной решению актуальной научной задачи моделирования внутреннего (завесного) охлаждения ракетного двигателя малой тяги на экологически чистых газообразных компонентах топлива. Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Богачева Дарья Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Соискатель имеет 10 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 10 работ; работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, 5. Из 10 работ по теме диссертации 3 работы – тезисы докладов на научных конференциях

общим объемом 0.62 п.л., 5 работ – статьи в ведущих рецензируемых журналах общим объемом 2.62 п.л., 2 работы – программы для ЭВМ. Все работы опубликованы в соавторстве. Краткая характеристика работ: приведены результаты экспериментальных исследований по эффективности завесного охлаждения камер сгорания ракетных двигателей, проведено сравнение данных, полученных с использованием нескольких существующих методик инженерной оценки теплового состояния ЖРД с результатами математического моделирования рабочих процессов в камере сгорания РДМТ в трехмерной постановке, проведена оценка возможности использования численных методов исследования для оценки теплового состояния конструкции РДМТ, работающего на газообразных компонентах топлива: метан и кислород, представлена программа для ЭВМ для математического и интерактивного графического анализа данных, полученных в процессе экспериментального испытания жидкостного ракетного двигателя малой тяги, работающего на газообразных метане и кислороде. Представленные в работах результаты получены либо лично автором, либо при непосредственном участии автора диссертационной работы.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. 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.
2. 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>.
3. Коватова 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>.
4. 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.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Отзыв на диссертацию ведущей организации ОАО ВПК "НПО машиностроения", подписанный Точиловым Леонидом Сергеевичем, кандидатом физико-математических наук, ученым секретарем ОАО ВПК "НПО машиностроения"; Решом Георгием Фридриховичем, кандидатом технических наук, первым заместителем начальника отделения энергосиловых установок ОАО ВПК "НПО машиностроения"; Новиковым Андреем Евгеньевичем, кандидатом технических наук, заместителем начальника ЦКБМ - начальником отделения энергосиловых установок ОАО ВПК "НПО машиностроения"; утвержденном Гришко Михаилом Ивановичем, доктором технических наук, профессором, первым заместителем генерального директора ОАО ВПК "НПО машиностроения". В отзыве приведены следующие замечания:

1. Рассмотрен только стационарный режим внутрикамерных процессов в ЖРДМТ, хотя для таких двигателей характерен в основном импульсный режим работы.
2. Не обозначены преимущества решателя ANSYS CFX перед аналогичными (в том числе отечественными) программными продуктами.
3. При вычислительном эксперименте (глава 3) не приведены оценка затрат машинного времени на решение типовой задачи моделирования и анализ эффективности применения программного комплекса ANSYS.
4. Не раскрыты существо и алгоритмическое построение программ автора для обработки результатов огневых испытаний (стр. 96).
5. Вызывает сомнение рекомендация о необходимости обеспечения ламинарного течения основного потока в КС РДМТ (стр. 23, п. 4).
6. Не раскрыта целесообразность проведения эксперимента с использованием воздуха в качестве завесы.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, **Ягодникова Дмитрия Алексеевича**, доктора технических наук, заведующего кафедрой «Ракетные двигатели» ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э.Баумана». Отмечены следующие замечания по диссертационной работе:

1. Расчеты проводятся для непрерывного режима работы, а для РДМТ характерен импульсный режим работы.
2. Нет обоснования принятия при численном моделировании (раздел 3.1) допущения о бесконечно большой скорости химических реакций, протекающих в камере сгорания РДМТ.
3. При расчете секторной области определено, что наиболее оптимальной схемой подачи компонентов является: на завесу - метан, на периферию - метан, в ядро потока - кислород. В дальнейшем при расчете полной камеры сгорания и при экспериментальной отработке двигателя рассмотрена другая схема подачи компонентов: на завесу - кислород, на периферию - кислород, в ядро потока - метан. Тем не менее обоснование данного выбора не приведено.
4. В работе отсутствует сравнение полученных результатов с экспериментально-теоретическими данными других авторов, в частности МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, **Александрова Льва Григорьевича**, кандидата технических наук, начальника сектора отдела «Двигательные установки» ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина». Замечания по диссертационной работе:

1. В рекомендациях по выбору значений безразмерного расстояния от стенки первого расчетного узла y^+ , коэффициентов интенсивности турбулентности (I) и диффузии (D) не показано влияние конструктивных характеристик головки смещения камеры сгорания (щель, форсунка, характер расположения элементов подвода на головке и т.д.) на выбираемые при расчете значения y^+ , I , D .
2. Не сформулированы рекомендации по выбору значения относительного расхода на завесу охлаждения для двигателей с кислородной и метановой завесами.
3. Представленные на рис. 42-44 и рис. 46-48 зависимости теоретически не должны идти от нулевого значения коэффициента избытка окислителя в ядре потока.
4. В подрисовочных текстах рис. 42, 44, 45, 48 и 49 имеется опечатка.

Все отзывы, поступившие на автореферат, положительные.

Отзыв на автореферат, поступивший из ОАО ТМКБ «Союз», подписан кандидатом технических наук, начальником экспериментально-испытательного отделения Петренко Владиславом Михайловичем, утвержден кандидатом физико-математических наук, Генеральным директором Яковлевым Н.Н. Сделаны следующие замечания:

1. В работе рассматривается непрерывный режим работы двигателя, хотя ракетные двигатели малых тяг работают, как правило, и в импульсных режимах.
2. В расчетах принята адиабатическая стенка камеры сгорания, в то время как учет тепловых потоков в стенке от критического сечения к головке КС может внести определенные коррективы в полученные результаты расчета.
3. Рассмотрен один вариант формирования завесы - у головки. Смещение расположения завесы вниз по потоку может оказаться более оптимальным.

Отзыв КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В.Хруничева на автореферат подписан кандидатом технических наук, заместителем начальника отдела Елисеевым Вячеславом Владимировичем; кандидатом технических наук, ведущим инженером-конструктором Суловым Юрием Григорьевичем; доктором технических наук, профессором, секретарем НТС КБ «Салют» ГКНПЦ им.М.В.Хруничева Бизяевым Ростиславом Владимировичем, утвержден доктором технических наук, Заместителем генерального конструктора И.С.Партолой. Сделанное замечание: целесообразно было бы рассмотреть применение модели для различных схем смесеобразования, для работы двигателей в импульсном режиме, а также верификацию модели для других двигателей.

Отзыв ОАО «ГРЦ Макеева» на автореферат подписан кандидатом технических наук, главным ученым секретарем Калашниковым Сергеем Тимофеевичем; кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Биткиным Сергеем Александровичем, заместителем генерального конструктора ОАО «ГРЦ Макеева» Молчановым Сергеем Филипповичем. Отмечены следующие замечания:

1. В модели горения состав продуктов сгорания определяется одной брутто-реакцией и не приведено обоснование такого подхода.

2. Результаты экспериментальных исследований автора достаточно убедительны, однако хотелось бы уточнить положение п.4 на стр. 23 в части вклада автора в разработку и создание экспериментального РДМТ.
3. Черно-белое исполнение графиков в автореферате затрудняет их анализ, следовало бы разнообразить тип линий (пунктирами).

Отзыв на автореферат, поступивший из ОАО КБХА, составлен и подписан начальником отдела 106 Чембарцевым Сергеем Владимировичем; кандидатом технических наук, ведущим конструктором Ефремовым Юрием Александровичем, утвержден кандидатом технических наук, Заместителем генерального конструктора - директором НТК и программ ЖРД А.В.Шостаком. В качестве замечаний к автореферату отмечено следующее:

1. Некоторые рисунки, приведенные в автореферате в черно-белом формате, являются неинформативными из-за их низкого качества.
2. На рисунке 15 отсутствует подпись оси абсцисс.

Отзыв на автореферат ОАО «НПО Энергомаш им. В.П.Глушко», подписан главным специалистом Кошелевым Игорем Михайловичем, доктором технических наук, заместителем начальника НИЦ ОАО Мартиросовым Давидом Суреновичем, утвержден доктором технических наук, профессором, Исполнительным директором, главным конструктором, председателем НТС В.К.Чвановым. В качестве замечаний отмечено, что:

1. Все расчеты выполнены для стационарных режимов работы, хотя ракетные двигатели малых тяг работают, как правило, в импульсном режиме.
2. Не указано, какой тип (конфигурация, форсунки) смесительной головки двигателя, используется в расчетах. Как известно, эти данные должны быть входными для моделирования рабочего процесса в камере.

Отзыв на автореферат, поступивший из ФКП «НИЦ РКП», составлен и подписан кандидатом технических наук, доцентом, членом-корреспондентом Российской академии космонавтики им. К.Э.Циолковского, начальником отдела Пикаловым Валерием Павловичем, ведущим инженером Ивановым Валентином Николаевичем, кандидатом технических наук, заместителем генерального директора Катениным Александром Владимировичем. Замечания по работе:

1. В случае использования модели диссипации вихря состав продуктов сгорания определяется одной брутто-реакцией. Использование более детальных химических реакций позволило бы получить более достоверное распределение температуры.
2. В работе приведено расчетное сравнение эффективности использования кислородной и метановой завес для защиты стенок камеры сгорания, показано преимущество метановой завесы с точки зрения достижения максимального удельного импульса и сохранении температуры стенки ниже 1400 К. Однако все представленные эксперименты проведены либо с кислородной, либо с воздушной завесой. Использование же метановой завесы для охлаждения стенок камеры сгорания требует проведения дополнительных экспериментов.

Отзыв на автореферат, поступивший из ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (НИУ)» (СГАУ), подписан кандидатом технических наук, ассистентом кафедры теории двигателей летательных аппаратов Шаблием Леонидом Сергеевичем и доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой теории ракетных двигателей летательных аппаратов СГАУ Матвеевым Валерием Николаевичем.

Замечания по автореферату:

1. Выглядит спорным и необоснованным принятое автором решение использовать сетку с количеством элементов 300 000, поскольку по мнению автора, применение более мелкой сетки дает те же самые результаты (абзацы сверху и снизу от рис. 6). На рис. 6 автореферата видно, во-первых, что при увеличении количества элементов сетки с 350 000 до 680 000 рассчитываемое давление в камере изменяется на 0,1...0,2 атм для разных моделей турбулентности и горения, что в относительном выражении составляет 2-4% при абсолютных уровнях давлений 4...6 атм. Такая погрешность расчета не может быть признана ничтожной при общем значении погрешности по давлению 6% (стр. 21, первый абзац). Во-вторых, даже если признать малым изменение на одном из интервалов графика, с точки зрения минимизации вычислительных затрат следовало бы принять размерность сетки, равной левой границе рассмотренного

интервала. Для последнего интервала $(350;680) \times 10^3$ элементов это 350 000. Принятая же размерность 300 000 относится к другому интервалу $(110;350) \times 10^3$ элементов, на котором график идет еще менее полого. Но если изменение параметров на нем также принято ничтожным, разумным было бы принять размерность сетки в 100 000, а не 300 000 элементов.

2. Отсутствует обоснование выбора используемой для расчетов модели турбулентности и горения, несмотря на то, что на предварительном этапе решения (рис. 6) видно, что разные модели дают очень разные результаты, отличающиеся на 2 атм (при среднем уровне 5 атм относительная разница составляет 40%).
3. Результаты расчетного исследования были без достаточного обоснования признаны удовлетворительно согласующимися с экспериментальными при расхождении 6 и 12% по давлению и температуре соответственно (первый абзац стр. 21). При сопоставлении параметров не была учтена погрешность экспериментального определения параметров. Для доказательства адекватности и значимости расчетных результатов не применялись формальные методики (например, критерий Фишера).

Отзыв на автореферат, поступивший из «КБхиммаш им. А.М.Исаева» - филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В.Хруничева», составлен ведущим специалистом отдела 402 Кармановым Алексеем Юрьевичем, подписан заместителем начальника отдела 410 Пегиным Иваном Вячеславовичем и кандидатом технических наук, главным конструктором направления – начальником отдела 410 Агеенко Юрием Ивановичем, утвержден кандидатом физико-математических наук, генеральным конструктором «КБхиммаш им. А.М.Исаева» И.А.Смирновым. Следующие замечания:

1. Следует отметить, что в автореферате на рис. 17, 18 приведены зоны повышенных температур при использовании в качестве завесного охладителя газообразного кислорода. Исходя из температурной шкалы, локальный нагрев достигает 2000°K , что не согласуется с результатами оптимизационного расчета при моделировании на секторной расчетной области (при кислородной завесе) и вероятно требует дополнительного пояснения.

2. Также считаем, что автору необходимо более основательно рассмотреть влияние приведенной длины камеры сгорания на энергетические характеристики и тепловое состояние, а также предложить методы сохранения газовой завесы на выбранной длине с обеспечением приемлемой неравномерности.
3. Также следует высказать замечание в части выполнения расчетов в стационарной постановке, хотя ракетные двигатели малой тяги работают, как правило, и в импульсных режимах.
4. Дополнительно автору можно порекомендовать уделить внимание системе зажигания и привести данные по характеристикам воспламенения с различными вариантами завесного охлаждения.

Отзыв ФГУП «НИИмаш» на автореферат составлен и подписан кандидатом технических наук, ведущим научным сотрудником научно-исследовательского отдела перспективных разработок ФГУП «НИИмаш» Саличем Василием Леонидовичем, утвержден заместителем директора по НИР – главным конструктором С.А.Булдашевым. Сделанные замечания:

1. Из автореферата не ясно, что представляет собой вещество «продукты сгорания» (стр. 12): это одно «вещество» или смесь 8 веществ, одним из которых является «окислитель» O_2 ?
2. Следовало бы привести двумерные распределения температур во всей расчетной области (а не только на граничном условии «стенка»), полученные при использовании различных моделей горения (EDM и Flamelet).

Отзыв на автореферат Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева, составленный и подписанный заведующим кафедрой двигателей летательных аппаратов, кандидатом технических наук, профессором Назаровым Владимиром Павловичем, содержит следующие замечания:

1. Представленные в автореферате рекомендации по конструкции смесительной головки камеры двигателя для организации завесного охлаждения имеют локальный характер и не полностью раскрывают возможности методики математического моделирования рабочего процесса в камере РДМТ.

2. При проведении физического эксперимента, обработке и анализе результатов испытаний следует более корректно подходить к выбору единиц измерения (в частности, давления), что позволяет избежать дополнительного перевода параметров эксперимента в единую систему измерений с применением соответствующих коэффициентов.

Отзыв на автореферат, поступивший из ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д.Ф.Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова), составлен кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» Кузьминым Алексеем Михайловичем, подписан секретарем заседания Савченко Григорием Борисовичем и заведующим кафедрой «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» Филимоновым Юрием Николаевичем, утвержден проректором по научной работе и инновационно-коммуникационным технологиям ФГБОУ ВПО «Балтийского государственного технического университета "Военмех" им. Д.Ф.Устинова» Матвеевым С.А. Отмечены следующие замечания:

1. Для используемых моделей горения не приводится сравнение температур конструкции КС, полученных расчетным и экспериментальным путем (стр. 16).
2. Из содержания автореферата не ясно, при каком значении безразмерного расстояния от стенки (y^+) проводились численные расчеты для оценки теплового состояния конструкции.
3. Из содержания автореферата не ясно, учтены ли погрешности измерений при расчете расходного комплекса камеры РДМТ.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в отрасли науки, к которым относится диссертационная работа, наличием публикаций по тематике исследования и согласием на оппонирование. Ведущая организация выбрана в соответствии с ее широко известными достижениями в ракетных отраслях науки, способностью определить научную и практическую ценность диссертации. Ведущей организацией предоставлен отзыв на результаты диссертационной работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методика численного моделирования внутрикамерных процессов в ракетном двигателе малой тяги с учетом завесного охлаждения, работающего на газообразном топливе кислород и метан, позволившая выявить особенности процессов смешения и горения газообразных компонентов в камере сгорания двигателя;

предложен подход к исследованию процесса завесного охлаждения в ракетном двигателе малой тяги, позволяющий значительно сократить временные и материальные затраты при проведении экспериментов за счет уменьшения объема проводимых испытаний;

доказана перспективность использования предложенной методики численного моделирования в качестве инженерной на этапе предварительных расчетов при проектировании РДМТ для оценки теплового состояния двигателя, работающего на газообразном кислородно-метановом топливе.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны ряд положений теории ракетных двигателей относительно применимости их в исследованиях внутрикамерных процессов в ракетных двигателях малых тяг, что вносит вклад в расширение представлений о процессах, происходящих в камерах сгорания ракетных двигателей малых тяг, работающих на газообразном кислородно-метановом топливе;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих численных методов исследования процессов гидрогазодинамики и горения на основе моделирования рабочих процессов с помощью программного продукта ANSYS CFX;

изучены факторы, влияющие на эффективность завесного охлаждения, взаимосвязи процессов смешения, горения топлива и охлаждения стенок камеры сгорания, особенности подачи компонентов топлива в камеру сгорания.

проведена модернизация численных методов, используемых при расчете внутрикамерных процессов в РДМТ.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана методика моделирования внутрикамерных процессов в ракетном двигателе малой тяги с учетом внутреннего завесного охлаждения, позволяющая провести предварительную оценку теплового состояния двигателя;

определены перспективы практического использования разработанной методики численного моделирования процессов в камере сгорания РДМТ для решения одной из актуальных задач - снижении временных и материальных затрат при проектировании и последующей отработке ракетного двигателя;

сформулированы практические рекомендации по организации завесного охлаждения в РДМТ, работающего на газообразных компонентах топлива;

представлены рекомендации и предложения по дальнейшему совершенствованию методик расчета высокоэффективных РДМТ, работающих на газообразных кислороде и метане.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

в экспериментальной части работы результаты получены с применением аттестованных средств измерений и регистрации параметров, обеспечивающих удовлетворительную точность результатов экспериментов;

расчетно-теоретическая часть работы построена на известных научных положениях и методах расчета, фундаментальных законах сохранения массы, количества движения и энергии, фундаментальных уравнениях теории горения, известных теплофизических данных метана и кислорода и термодинамических данных при их взаимодействии, результаты расчетно-теоретической части работы удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными;

использованы современные автоматизированные системы сбора и обработки информации, поступающей из систем измерения данных в ходе экспериментальных исследований.

Личный вклад соискателя состоит в:

разработанной методике моделирования внутрикамерных процессов в РДМТ с учетом внутреннего завесного охлаждения, проведенном критическом анализе результатов численного исследования, сопоставлении расчетных данных и экспериментальных результатов, в проведении экспериментальных исследований,

