

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Дмитрия Алексеевича Ягодникова,  
работающего в ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э.Баумана» в должности заведующего  
кафедрой "Ракетные двигатели",

адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1,

тел.: +7 (499) 267-89-03

на диссертационную работу Богачевой Дарьи Юрьевны  
**«Моделирование внутреннего (завесного) охлаждения ракетного двигателя  
малой тяги на экологически чистых газообразных компонентах топлива»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертационная работа Богачевой Дарьи Юрьевны посвящена расчетно-теоретическому и экспериментальному исследованию завесного охлаждения в ракетном двигателе малой тяги, использующем газообразные кислород и метан.

Актуальность темы работы определяется тем, что одним из основных направлений развития ракетно-космической техники является сокращение материальных и временных затрат на разработку средств выведения и ракетных двигателей. Использование современных методов расчета, основанных на численном моделировании, может стать одним из путей решения этой задачи.

Несмотря на большой объем полученных к настоящему времени результатов экспериментально-теоретических исследований не разработана методика расчета турбулентного перемешивания потока, формирующего и обеспечивающего завесное охлаждение, с основным потоком продуктов сгорания применительно к рабочим процессам в РДМТ. Поэтому работа Богачевой Д.Ю., посвященная совершенствованию методик расчета высокоэффективных РДМТ с учетом завесного охлаждения совместно с моделированием внутрикамерных процессов, является актуальной.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна

работы и ее практическая значимость и дается общее описание выполненной работы.

*В первой главе* приводится обзор экспериментальных исследований завесного охлаждения в ЖРД, рассматриваются существующие математические модели для расчета соотношения компонентов топлива в пристеночном слое. Сформулирована цель диссертационной работы, заключающаяся в повышении эффективности РДМТ, работающего на непрерывном режиме, и сокращение количества огневых испытаний двигателя путем разработки и применения методики численного моделирования внутрикамерных процессов в РДМТ с учетом завесного охлаждения.

Сформулированы также основные задачи, которые заключаются в проведении комплекса экспериментально-теоретических исследований кислород-метанового РДМТ, работающего на непрерывном режиме.

*Во второй главе* автор приводит подробное описание объекта исследования - экспериментального ракетного двигателя тягой 200 Н. Его отличительными особенностями являются: щелевая смесительная головка, изготовленная с использованием современных аддитивных технологий; охлаждение стенок камеры сгорания только при помощи внутреннего завесного охлаждения. С учетом наземных испытаний без использования высотных стендов в работе используется камера сгорания с укороченным соплом.

Далее дается описание выбранной математической модели, приводятся ее особенности, заключающиеся в форме записи системы уравнений, описывающей течение и взаимодействие компонентов; в допущениях, принятых в модели; в замыкающих зависимостях (моделях турбулентности и моделях горения), в требованиях к расчетной сетке моделируемой области камеры РДМТ.

Выявлены ограничения используемых в рамках ANSYS CFX моделей горения диссипации вихря и модели тонкого фронта пламени, предложены меры по снижению выявленных ограничений.

*В третьей главе* диссертации проводится расчетно-теоретическое исследование рабочих процессов в камере сгорания РДМТ. На первом этапе численного исследования автором выполнено моделирование процессов в камере сгорания (на одной восьмой части) ракетного двигателя с учетом химических реакций для различных способов подачи компонентов топлива. Определены требуемые для формирования завесы расходы компонентов, обеспечивающие максимальный удельный импульс при удовлетворительном тепловом состоянии конструкции. Следующий этап заключался в моделировании рабочих процессов на полноразмерной камере сгорания и гидравлической части смесительной головки, что позволило провести исследование с учетом распределения компонентов топлива по смесительной головке. Автором показана возможность использования двух подходов для моделирования процесса турбулентного горения в РДМТ: модели диссипации вихря и модели тонкого фронта пламени, а также приводятся границы применимости обеих моделей.

*Четвертая глава* диссертационной работы посвящена экспериментальному исследованию и сравнению полученных в процессе их проведения результатов с расчетными. Дается описание экспериментального стенда, методики проведения огневых испытаний. Представлены основные результаты огневых испытаний разработанного двигателя. Проведенное автором качественное и количественное сравнение результатов экспериментального и расчетного исследований показало удовлетворительное согласование этих данных (с погрешностью по температуре стенки не более 13% и по давлению в камере сгорания не более 7%). На этом основании автором делается вывод о возможности применения математической модели для оценки интегральных параметров двигателя на стадии предварительных расчетов при проектировании РДМТ с внутренним

завесным охлаждением. Приводятся рекомендации и предложения по организации эффективного завесного охлаждения и расчету РДМТ на ранних этапах проектирования.

*В заключение* работы сформулированы выводы по проведенному исследованию.

*Научная новизна* работы заключается в том, что автором диссертационной работы Богачевой Д.Ю. разработана в трехмерной постановке математическая модель внутрикамерных процессов в РДМТ с учетом завесного охлаждения.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается сопоставлением численных решений с экспериментальными результатами самого автора. Практическая значимость работы заключается в том, что созданная методика позволяет проводить расчеты натуральных РДМТ с завесным охлаждением на газообразных компонентах топлива.

Опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации. Работа апробирована на Всероссийских и Международных научно-технических семинарах и конференциях; по теме диссертации имеется десять публикаций, пять из которых опубликованы в изданиях, входящих в список рекомендуемых ВАК научных журналов.

Автореферат написан грамотным техническим языком.

В качестве замечаний и недостатков можно указать следующие.

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.

Приведенные замечания не меняют положительного мнения о работе, являющейся законченным научным исследованием, в котором изложены научно-обоснованные технические решения по повышению эффективности РДМТ и сокращению количества огневых испытаний за счет применения методики численного моделирования, имеющие существенное значение для развития страны. Диссертация полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Богачева Д.Ю. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Официальный оппонент,

Заведующий кафедрой

“Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э.Баумана

д.т.н., профессор

*Д.А. Ягодников*  
02/XII 2014г.

Д.А. Ягодников

Подпись Ягодникова Д.А. заверяю



«ВЕРНО»

ДИРЕКТОР УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
ИМ. Н.Э. БАУМАНА

*Барышников*  
В. БАРЫШНИКОВ