

**Отзыв
официального оппонента
на диссертационную работу
Строкача Евгения Александровича
«Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания ракетного
двигателя малой тяги с центробежными форсунками», представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности: 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов».**

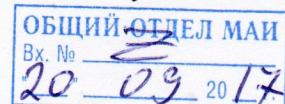
Актуальность работы основана на важности повышения энергетической эффективности и широком использовании РДМТ в ракетно-космической технике, а также необходимости улучшения методики их компьютерного проектирования, в части повышения качества рабочих процессов, за счет комплексности их охвата и применения подходов оптимизации. Актуальной представляется проблема создания моделей, позволяющих проводить оценку влияния параметров подачи на полноту сгорания в КС РДМТ с жидкостной завесой.

Научная новизна оппонируемой работы заключается в следующем:

1. Проведен анализ влияния основных параметров ввода топлива форсунками (распределение капель по диаметрам, компоненты скорости ввода) на полноту сгорания в КС РДМТ.
2. Предложена методика моделирования завесного жидкостного охлаждения с помощью подхода Лагранжа-Эйлера и проведен анализ влияния основных параметров подачи пояса завесы (диаметр капель завесы, скорость подачи) на полноту сгорания в КС РДМТ.
3. Предложены рекомендации по увеличению полноты сгорания путем оптимизации параметров подачи топлива в КС РДМТ.
4. Предложена «сквозная» методика оценки рабочих процессов смесеобразования и сгорания компонентов топлива в КС и последующей оптимизации системы смесеобразования.

Практическая значимость оппонируемой работы заключается в том, что:

1. Разработанная автором инженерная методика расчета процессов смесеобразования и сгорания жидкого топлива позволяет повысить точность прогнозирования параметров эффективности двигателя.
2. Показано, что корректное численное моделирование (постановка граничных условий) рабочих процессов (от распыла до испарения и сгорания) с помощью программного комплекса ANSYS CFX сравнимо по точности оценки характеристик эффективности в РДМТ с экспериментальными данными, что может позволить снизить время и стоимость проектирования КС РДМТ за счет более широкого применения численных расчетов.
3. Предложенная методика «сквозного» расчета рабочих процессов в КС и последующая оптимизация смесительных элементов позволяет существенно



усовершенствовать процесс разработки двигателя, упростить и ускорить оценку параметров рабочего процесса и добиться высокой эффективности РДМТ.

Апробация подтверждена участием автора с докладами по тематике работы на четырех всероссийских и международных конференциях, а основные результаты диссертации ранее опубликованы в 4 рецензируемых журналах.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов базируется на применении автором общепринятых уравнений движения сжимаемой жидкости (уравнения Навье-Стокса), применении сертифицированного пакета по численному моделированию (ANSYS CFX), учетом важнейших физико-химических процессов, хорошим совпадением результатов численных расчетов и физических экспериментов. Производится учет химических превращений на основе моделей диссипации вихря и тонкого фронта пламени.

В работе обоснованы следующие допущения: продукты сгорания и компоненты топлива являются идеальными газами, стена КС адиабатическая, применяется метод Эйлера-Лагранжа для моделирования завесного охлаждения, химические реакции протекают бесконечно быстро, расчеты стационарны. Все выводы и рекомендации автора обоснованы.

Во введении сформулирована актуальность темы. Отмечено, что численное моделирование имеет преимущества по сравнению с другими методами исследования, но для правильного его применения необходима верификация с использованием экспериментальных результатов. Описываются наиболее распространенные подходы для расчета среднего диаметра Заутера, подходы моделирования двухфазных потоков и физических процессов, связанных с дроблением сплошного потока несжимаемой жидкости. С учетом распространенности форсунок центробежного вида и сложности их расчета, рассматривается смесеобразование форсунками этого вида.

В первой главе проведен анализ источников по оценке качества смесеобразования однокомпонентными гидравлическими и двухкомпонентными газожидкостными центробежными форсунками. Рассмотрены существующие подходы к моделированию двухфазных течений, в том числе потоков со свободной границей, с учетом дробления и смесеобразования, а также распределения капель по диаметру. Обзор показывает актуальность развития и применения численных методов для моделирования двухфазности, а также комбинированных методов, базирующихся на сопряжении численных и эмпирико-аналитических методов. Сделан вывод, что имеется хорошая теоретическая база для одновременного моделирования процессов, в т.ч. подачи, распыла, смешения, горения и течения смеси для создания «сквозной» методики расчета процессов в РДМТ. Автор упоминает особенности решателей нескольких пакетов инженерного анализа, таких как ANSYS CFX, ANSYS FLUENT и STAR-CCM+.

Во второй главе описывается объект исследования – рабочий процесс в КС и субъект исследования - экспериментальный РДМТ ДМТ-МАИ-200, работающий на компонентах «керосин-газообразный кислород». Описываются процессы, протекающие в тракте РДМТ. При этом конкретизируется

направление диссертационных исследований — изучение влияния параметров ввода на эффективность рабочего процесса в КС, характеризующуюся полнотой сгорания и последующая оптимизация. После прочтения второй главы остается ощущение, что она является частью или продолжением первой главы и носит описательный характер накопленного в отрасли опыта. Забегая вперед можно сказать, что и в 4-й главе есть элементы обзора имеющихся подходов по тематике работы.

В третьей главе проводится численное изучение влияния параметров подачи на интегральные параметры эффективности рабочего процесса, представляющие собой расходный комплекс и полноту сгорания. Достойное место автор отводит системе допущений принятой им при моделировании рабочего процесса в КС РДМТ. Моделирование, для ускорения счета, проводится на базе секторной области проточной части КС, учет подачи компонентов через форсунки происходит с помощью условий входа. Описаны допущения модели, модели частных процессов, описана цель исследования рабочего процесса. Не учитываются теплообмен с материалом стенки КС и внешняя область. Автор выбирает комбинацию моделей отдельных процессов наиболее экономичных с точки зрения вычислительных ресурсов.

Автор скрупулезно пытается разобраться в моделях горения, которые он применяет в составе ANSYS. В целом, конечно, выбор подмоделей рабочего процесса ограничен возможностями имеющегося пакета инженерного анализа. Автор проводит оценку сходимости сеточной модели, но не приводит количественных оценок этих исследований. Это тем более важно, что автор не указывает, на какой вычислительной технике он проводит инженерные расчеты. Можно предположить, что на машинах средней мощности, где «сквозные» расчеты можно проводить на крупной сетке и в этой связи интересны обоснованные границы применимости «сквозных» методик с точки зрения ресурсов ЭВМ, которыми располагают среднестатистические инженеры. Автор касается современных моделей типа DNS, справедливо отмечая их вычислительную громоздкость и неприспособленность для оперативного инженерного анализа.

Интересными представляются исследования автора, изучающего влияние на эффективность внутрикамерного процесса соотношений скорости периферийных и осевой форсунок. Причем отдельно проведено исследование без учета завесы охлаждения, а затем с учетом ее влияния. При этом производится изучение влияния компонент скорости подачи в ядро течения, среднего размера капель и вида распределения капель по диаметрам, параметров завесного охлаждения — скорости и среднего диаметра частиц. Численные результаты сравниваются с термодинамическим расчетом. Производится оптимизация внутрикамерного процесса путем изменения параметров ввода. Что касается дисперсности, то автор исследует влияние заутеровского диаметра и параметров распределения Вейбулла — параметра ширины распределения и параметра размера.

Показано существенное влияние соотношений компонентов скорости, так и дисперсности. Причем результаты при наличии в конструкции и без пояса

завесы существенно отличаются. В некоторых случаях, полученные выводы и результаты приводятся с теоретическим объяснением явлений автором. В целом автор создал математическую модель, на основе которой можно получить оптимальную картину рабочего процесса в КС и с ее помощью выявить оптимальную конструкцию и режимы работы форсунок и пояса завесы, что позволяет высоко оценить данную работу.

В четвертой главе проводится верификация разработанной модели рабочего процесса на базе экспериментальных результатов. Показана хорошая сходимость экспериментальных и модельных данных по полноте сгорания и давлению в камере. Относительная погрешность не превышает 8%.

Также рассматривается методика «сквозного» проектирования смесительных элементов и КС, основанная на проведении численной оценки качества смесеобразования в форсунках и задании этих результатов в качестве граничных условий для численного моделирования рабочего процесса в КС. Изучение рабочего процесса в КС предлагается проводить на базе численных методов моделирования. Основной новизной методики является разделение алгоритмов оценки смесеобразования центробежными однокомпонентными форсунками по числу Вебера. При величине данного параметра выше 27/16 автор предлагает пользоваться эмпирико-аналитической формулой определения распределения капель по диаметрам, разработанной G. Brenn и A. Tratnig в университете Граца, что позволяет существенно упростить процесс проектирования. Автор не только обосновывает и предлагает методику, но и подробно анализирует ее перспективы, преимущества и недостатки.

Особо хочу отметить то, как автор ответственно, осмысленно подходит к обоснованию физической и математической моделей, полученных результатов и выводов, используя в том числе результаты физических экспериментов и накопленный в отрасли опыт по созданию РДМТ.

Автореферат отражает основное содержание диссертации. Результаты работы автором опубликованы, в т.ч. в рецензируемых журналах.

Положительно оценивая представленную работу, нужно высказать следующие замечания:

1. Не предоставлено детальных данных об исследовании численной сходимости сетки;
2. Не учитывается теплообмен со стенкой КС, смесительной головкой и внешней средой;
3. Не проводится исследования влияния модели турбулентности на эффективность рабочего процесса.
4. Приводится пример использования, но не проводится верификация «сквозной» методики проектирования;
5. На стр.86 в табл.7 полнота сгорания посчитана с ошибкой и не соответствует приведенным в этой же таблице β .
6. На стр. 99 алгоритм расчета показан линейным и не имеет итерационной составляющей, характерной для поиска оптимального варианта.
7. Имеется несколько орфографических ошибок — на стр. 19,68,73,74,87 диссертации, стр.6 автореферата; есть погрешности в оформлении на стр.

18,54,62,66,69,70,108; имеются неточные формулировки в предложениях на стр. 29,43,44,48,60,61,68,84,87,91,92,99,104; на стр.70 и 65 Таблицы 2 и 4 одинаковы, не подписаны параметры на стр.68.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не влияют на основные результаты.

Диссертация Строкача Е.А. является законченной научно-квалификационной работой, включающей новые научные результаты, их обоснование и приложение к задачам проектирования РДМТ. Цель работы достигнута.

Диссертация отвечает требованиям всех пунктов Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор, Строкач Евгений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Д.т.н., доцент,
зам. декана аэрокосмического
факультета по учебной работе,
профессор кафедры Механики
композиционных материалов и
конструкций,
Директор Центра
высокопроизводительных
вычислительных систем

Модорский Владимир
Яковлевич
«7» сентябрь 2017 г.

614990, г.Пермь, Комсомольский пр., 29, Пермский национальный
исследовательский политехнический университет, аэрокосмический факультет,
ауд. 206, корп.Д, 83422391224 (раб.), modorsky@pstu.ru

Подпись В.Я. Модорского удастствую.
Ученый секретарь ФНПУ им.Ист.Ильинского
доцент

«7» сентябрь 2017



Макаревич Владимир
Иванович