

# СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.08

**Соискатель:** Строкач Евгений Александрович

**Тема диссертации:** «Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя малой тяги с центробежными форсунками»

**Специальность:** 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

## **Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:**

На заседании 9 октября 2017 года диссертационный совет пришёл к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и принял решение присудить Строкачу Евгению Александровичу ученую степень кандидата технических наук.

**Присутствовали:** председатель диссертационного совета Равикович Ю.А.,  
ученый секретарь диссертационного совета Зуев Ю.В., члены  
диссертационного совета:

Абашев В.М., Агульник А.Б., Демидов А.С., Дзюбенко Б.В., Коротеев А.А.,  
Кочетков Ю.М., Краев В.М., Кулешов Н.В., Мякочин А.С., Надирадзе А.Б.,  
Назаренко И.П., Ненаркомов А.В., Никитин П.В., Попов Г.А., Тазетдинов Р.Г.,  
Тимушев С.Ф., Хартов С.А., Козлов А.А., Чванов В.К.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д.212.125.08, д.т.н., профессор

Зуев Ю.В.



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.08  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ  
ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ)» МИНИСТЕРСТВА ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело №\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 09 октября 2017 №21

О присуждении Строкачу Евгению Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя малой тяги с центробежными форсунками» по специальности 05.07.05. - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» принята к защите 19.06.2017г., протокол №13 диссертационным советом Д 212.125.08 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации, 125993 г. Москва, А - 80, ГСП - 3, 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 08.08.2009 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 № 508/нк от 22.08.2012 г., об изменении состава диссертационного совета - № 548/нк от 06.10.2014 г.

Соискатель - Строкач Евгений Александрович 1991 года рождения, работает инженером 1-ой категории в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки Российской Федерации.

В 2014 соискатель окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». В настоящее время соискатель ученой степени осваивает программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» со сроком ее окончания в 2018 году.

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

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Козлов Александр Александрович, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный

исследовательский университет)», кафедра «Ракетные двигатели», профессор.

Официальные оппоненты:

1. Модорский Владимир Яковлевич – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра механики композиционных материалов и конструкций, профессор;

2. Усов Генрих Леонидович – кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Техномаш», отделение технологий испытаний и неразрушающих методов контроля, ведущий научный сотрудник,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное казенное предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности», г. Пересвет, в своем положительном заключении, подписанном Галеевым А.Г., доктором технических наук, профессором, главным научным сотрудником НИО - 512, Орловым В.А., кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником НИО - 512, Лещенко Г.С., ученым секретарем ФКП «НИЦ РКП» и утвержденном Кучкиным В.Н., к.т.н., доцентом, первым заместителем генерального директора по испытаниям, указала, что диссертация соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842. Срокач Е.А. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата

технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Соискатель имеет 8 опубликованных работ, в том числе 8 работ по теме диссертации общим объемом 3.47 п.л.; работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 4. Из 8 работ 4 статьи – в журналах, 4 работы – тезисы в сборниках трудов конференций. Все работы выполнены в соавторстве. Научные работы соискателя посвящены анализу влияния параметра ввода компонентов топлива на интегральные показатели эффективности рабочего процесса с помощью численного моделирования, разработке и верификации модели рабочего процесса с учетом завесного охлаждения жидким компонентом, расчету распыливания жидкости центробежными смесительными элементами. Недостоверные сведения об опубликованных работах отсутствуют. Основным авторским вкладом Строкача Е.А. в опубликованных работах является проведение численного моделирования рабочего процесса, оценка результатов, исследование влияния параметров ввода на эффективность рабочего процесса, верификация модели рабочего процесса с учетом завесного охлаждения жидким компонентом.

Наиболее значимые работы:

1. Боровик И.Н., Строкач Е.А. Влияние дисперсности распыла капель форсунками на полноту сгорания топлива в жидкостном ракетном двигателе // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника – 2016. № 44. С. 45-62.

2. Козлов А.А. Строкач Е.А. Исследование методики моделирования рабочего процесса в камере сгорания жидкостных ракетных двигателей малых тяг на основе модели диссипации вихрей // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2016. № 44.

С. 27-44.

3. Козлов А.А., Боровик И.Н., Строкач Е.А. Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя малой тяги // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. № 2. С. 109-112.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**Отзыв на диссертацию** ведущей организации, ФКП «НИЦ РКП». В качестве замечаний отмечается:

1. Автор не учитывает теплообмен с окружающей средой через стенку КС, что является серьезным допущением модели. Также не проводится сравнения данных моделирования на 1/6 секторной области полноразмерной расчетной сетке, хотя для последующего применения модели рабочего процесса было бы важно иметь информацию о разнице результатов при использовании разных постановок.

2. Автором не проведено тестирование основных моделей, описывающих поведение двухфазного потока в камере сгорания на простейших тестовых задачах, на которых обычно проводят верификацию и валидацию программного кода перед проведением исследовательских расчетов. Модели движения, испарения, дробления капель двухфазного потока, модели горения, модели турбулентности, включенные в пакет программ CFX, обычно требуют определенного подбора параметров. Для моделирования горения капель в камере сгорания ЖРД они могут отличаться от параметров, данных в пакете по умолчанию.

3. Акцент работы делается на том, что в КС ЖРДМТ горят капли (керосина), однако не представлен детальный анализ выбора параметров распыла газожидкостной форсунки, хотя ее геометрия может быть определена даже из краткого описания, приведенного в

диссертации. Кроме того, вместо рассмотрения течения и дробления капель закрученным потоком внутри и на выходе из газовой центробежной форсунки (например, в рамках модели «Enhanced blob»), которое дает более-менее реальные параметры потоков газа и капель, на части огневого днища, где размещается форсунка кислорода, было использовано граничное условие, задающее закрученный поток кислорода с каплями с усредненными параметрами (диаметр капель – 20 мкм и одинаковая скорость газа и капель – 21 м/с). Выбор этих граничных условий на входе в камеру должен быть более аргументирован, поскольку, как показано в главе 3, они оказывают определяющее влияние на полноту сгорания.

**Отзыв на диссертацию** официального оппонента д.т.н., доцента Модорского Владимира Яковлевича. В отзыве отмечены 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  $\beta$ .
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, 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.

**Отзыв на диссертацию** официального оппонента к.т.н. доцента Усова Генриха Леонидовича. В отзыве отмечены следующие замечания:

1. В работе проведено исследование численной сходимости расчетной сетки, однако подробные данные не предоставлены
2. Указывается, что на основе предварительного исследования для моделирования вторичного дробления выбрана модель каскадного дробления. В этом случае желательно также было предоставить более проведенную информацию о проведенном исследовании.
3. Не учитывается сток тепла через стенки КС.
4. Не проводится сравнение на полноразмерной расчетной сетке

**Отзыв на автореферат диссертации** АО КБХА, подписанный Ефимочкиным А.Ф., д. техн. наук, профессором, ученым секретарем НТС и утвержденный главным конструктором АО КБХА, д. техн. наук, профессором В.Д. Гороховым. В отзыве отмечены следующие замечания:

1. Не учитывается теплообмен со стенкой и внешней средой
2. Как правило, ЖРДМТ работают в импульсном режиме, а в работе рассматривается непрерывный режим, что может влиять на формирование слоя завесы.
3. Отсутствует обоснование выбранной модели турбулентности

4. Отсутствует обоснование использованной модели горения и кинетики взаимодействия топливной пары кислород+керосин
5. Отсутствуют выводы и рекомендации по выбору геометрических характеристик смесительных элементов с целью оптимизации рабочего процесса в камере
6. Отсутствуют рекомендации в части выбора величины расхода на завесное охлаждение
7. Отсутствуют количественные оценки влияния исследованных факторов на параметры течения, которые могут быть получены в результате оптимизации.

**Отзыв на автореферат диссертации** Матвеева В.Н., д. техн. наук, профессора, зав. кафедрой теории двигателей летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, Шустова С.А., канд. техн. наук, доцента кафедры теории двигателей летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева. В отзыве отмечены следующие замечания:

1. На странице 11 автореферата указано об использовании допущения о бесконечно большой скорости химических реакций, обусловленное высокой температурой в камере сгорания, превышающей 2000 К; однако такая температура продуктов сгорания характерна лишь для области камеры сгорания, примыкающей к входу в сопло, а для остальных областей камеры эта температура существенно ниже.
2. На рисунках 8 и 9 автореферата для величин расходного комплекса и полноты сгорания показано сравнение результатов численных расчетов с экспериментом, при этом отличие этих результатов составляет величину около 8%, однако причины такого

расхождения в автореферате не указаны.

**Отзыв на автореферат диссертации** «НПО Энергомаш им. Академика В.П. Глушко», подписанный Мартиросовым Д.С., д. техн. наук, заместителем начальника научно-исследовательского центра, Ивановым Н.Г., и.о. начальника отдела агрегатов ЖРД и утвержденный заместителем генерального директора - главным конструктором Левочкиным П.С. имеет следующие замечания:

1. Не указано, для каких диапазонов давления в камере сгорания проведены численные исследования
2. Не приведены затраты машинного времени на проведение расчетов.

**Отзыв на автореферат диссертации** ПАО ТМКБ «Союз», подписанный Петренко В.М., канд. техн. наук, ведущим научным сотрудником экспериментально-исследовательского отдела и утвержденный генеральным директором Шульгиным А.Ф. содержит замечания:

1. Рисунки 4,5,6 выполнены в очень малом масштабе, что не позволяет определить принадлежность нанесенных на графики точек к параметрам распределения.
2. При анализе влияния формы распределения капель жидкого компонента на рабочий процесс в камере сгорания (стр. 16) автор утверждает, что широкое распределение является предпочтительным, объясняя это устойчивостью полноты сгорания и ее высоким значением, но при этом не понятно, что автор вкладывает в понятие «устойчивости полноты сгорания»
3. На графиках рис. 7 и рис. 8 представлены расчетные и экспериментальные значения давления в камере сгорания  $P_k$  и расходного комплекса  $\beta$  на разных режимах. При этом не понятно, почему на режимах №1 и №3 (рис. 7), где расчетные и

экспериментальные значения  $P_k$  совпадают, значения  $\beta$  (рис. 8) расчетные и экспериментальные отличаются, хотя из соотношения  $\frac{P_k F_{kp}}{m_{\text{сумм}}}$  этого расхождения не должно быть.

**Отзыв на автореферат диссертации** ОКБ им. А. Люльки, филиала ПАО "ОДК-УМПО", составленный Федоровым С.А., начальником отдела 2000 и утвержденный Марчуковым Е.Ю., генеральным конструктором-директором, д. техн. наук, профессором, имеет замечания:

1. Предложенная методика носит довольно частный характер ввиду сделанных допущений.
2. Неполное описание граничных условий модели камеры сгорания.

**Отзыв на автореферат диссертации** Мосолова С.В., канд. физ.-мат. наук, и.о. заместителя генерального директора по качеству, начальника отделения 1 Государственного научного центра Российской Федерации – федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» имеет замечания:

1. Отсутствие в авторефере иллюстративных материалов, демонстрирующих результаты численного моделирования пространственной структуры рабочего процесса в камере РДМТ ( поля температур, концентраций, траекторий капель и т.д.) затрудняет восприятие результатов работы.

2. Из представленных в авторефере материалов не ясно:  
- какая конкретно модель турбулентности использовалась, и каким образом учитывалось влияние испаряющихся капель на процессы генерации и диссипации параметров турбулентности газовой фазы;

- учитывался ли перенос дискретной (капельной) фазы в потоке за счет воздействия на них турбулентных пульсаций газа;
- учитывались ли возможности реализации различных мод индивидуального и группового горения-испарения капель горючего, находящихся в среде газообразного окислителя.

**Отзыв на автореферат диссертации** Новикова А.Е., канд. техн. наук, заместителя начальника ЦБКМ, Реша Г.Ф., канд. техн. наук, первого заместителя начальника отделения, Иванова М.Ю., канд. физ.-мат. наук, старшего научного сотрудника АО «ВПК «НПО Машиностроения», содержит следующие замечания:

1. Каким образом при разработке математической модели рабочего процесса в камере сгорания РДМТ принятное допущение о стационарности расчетов (стр. 11) согласуется с видом уравнений сохранения (1)-(3), (5) в дифференциальной форме, которые содержат время  $t$  в качестве независимой переменной;
2. Из каких соображений автором не рассматриваются уравнения движения и энергии для каждой компоненты многофазной смеси (записано только уравнение неразрывности (5)), а также не приводится информация о сеточной сходимости, шаге интегрирования, времени расчета одного варианта прямой задачи и т.д., что является стандартным при практическом применении программного комплекса конечно-элементного моделирования Ansys;
3. Почему не отражена взаимосвязь процедуры оптимизации смесительных элементов в камере сгорания РДМТ с полнотой сгорания.

**Отзыв на автореферат диссертации** ФГУП «НИИМаш», подписанный канд. техн. наук, ведущим научным сотрудником Саличем В. Л., утвержденный зам. директора по НИР – главным

конструктором Булдашевым С.А. содержит замечания:

1. Помимо ЮУрГУ, «Центра Келдыша» и МАИ, как организаций, занимающихся моделированием процессов в РДМТ на компонентах «газ-жидкость», следовало бы также указать МГТУ им. Н.Э. Баумана (например, работа [Ягодников Д.А., Антонов Ю.В., Новиков А.В. Расчетные исследования по оптимизации схемы и параметров подачи компонентов топлива в камере сгорания РДМТ на топливе кислород-керосин // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана): электронный журнал – 2011, №12 и др.]

2. Математическая модель не учитывает различие скоростей испарения составляющих керосин фракций, что может оказывать существенное влияние на рабочий процесс в камере сгорания, например, приводить к сажеобразованию.

3. В автореферате желательно бы привести распределения параметров рабочего процесса по объему камеры, полученные по результатам численного моделирования.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в отрасли науки, к которой относится диссертационная работа Строкача Е.А., что подтверждается их научными публикациями в данной области.

Выбор Модорского В.Я., д. техн. наук, доцента, в качестве официального оппонента обосновывается его широкой компетентностью в вопросах численного моделирования течений в узлах двигателевых и энергетических установок со сложной геометрией, в том числе с наличием двухфазности. Кроме того, Модорский В.Я. имеет опыт расчета и руководства работами по численному моделированию распыливания жидкого компонента топлива, смешению, дроблению пленки жидкости и

методологической проработке решения.

Выбор Усова Г.Л., канд. техн. наук, доцента, обосновывается его большим опытом в области моделирования течений в элементах жидкостных ракетных двигательных установок, в том числе с учетом сложных физических явлений, а также построения алгоритмов сравнения результатов численного моделирования и эксперимента.

Ведущая организация выбрана в соответствии с её высоким уровнем достижений в области разработки ракетно-космической техники, дающим возможность определения научной и практической ценности диссертации. Основная деятельность ведущей организации связана с обеспечением надежности и наземной отработкой двигателей, а также изучением особенностей рабочего процесса в двигателе, что существенно влияет на его интегральные показатели. Специалисты ведущей организации, в том числе составившие отзыв на диссертацию, обладают опытом изучения рабочего процесса, как экспериментального, так и расчетного, базирующегося на численном исследовании сложных физических явлений с двухфазностью, испарением жидкой фазы, ее дроблением и горением.

Оппоненты и специалисты ведущей организации имеют публикации в международных и отечественных рецензируемых журналах по теме работы.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- разработана модель рабочего процесса в камере сгорания (КС) РДМТ с учетом завесного внутреннего охлаждения жидким компонентом топлива, позволяющая использовать ее для разработки РДМТ, исследования процессов внутри КС РДМТ;

- доказано, что метод Эйлера-Лагранжа для моделирования двухфазного течения с распыленным жидким компонентом может использоваться при моделировании внутреннего завесного охлаждения в РДМТ; корректная постановка граничных условий и выбор моделей частных физических процессов вместе с допущениями расчета позволяет получать удовлетворительное согласование с экспериментом по полноте сгорания, расходному комплексу, давлению в КС.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

- изучены взаимосвязи параметров ввода компонентов топлива
- компонент скорости подачи, формы распределения капель по размерам, среднего диаметра капель и процессов смешения, горения компонентов топлива, их влияния на эффективность рабочего процесса, выраженную расходным комплексом и полнотой сгорания;
- проведена модернизация существующих алгоритмов и численных методов изучения рабочего процесса в РДМТ, обеспечивающих получение результатов по теме работы;

**применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс общезвестных и признанных методов численного исследования гидрогазодинамических и тепловых процессов, процессов испарения жидкого компонента, процессов горения газообразного топлива в пакете прикладных программ ANSYS CFX;**

**Значение полученных соискателем результатом исследований для практики подтверждается тем, что:**

- разработана и протестирована методика «сквозного» расчета и оптимизации рабочего процесса и смесительных элементов. Это

позволяет, при должной верификации, пользоваться методикой при автоматическом оптимизационном проектировании КС РДМТ и смесительных головок;

- разработана и верифицирована модель рабочего процесса, которая может быть внедрена в методику «сквозного» расчета и итерационной последовательной оптимизации рабочего процесса и смесительных элементов и применяться при проектировании РДМТ;

- представлены рекомендации по использованию методов вычислительной гидрогазодинамики для расчета течения в КС РДМТ, состоящие в выборе граничных условий, моделей физических процессов, допущениях; представлены рекомендации по дальнейшему совершенствованию способов ввода компонентов топлива для двигателей с центробежным способом распыливания;

- подтверждено существенное влияние формы распределения капель по размерам на эффективность рабочего процесса, описаны вид и степень влияния на интегральные параметры эффективности рабочего процесса

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- использованы результаты экспериментальных работ на огневом стенде кафедры «Ракетные двигатели» факультета «Двигатели летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»; численное моделирование реализовано на базе использования пакета программного обеспечения ANSYS CFX, которое является сертифицированным средством для расчета задач гидрогазодинамики, горения, смешения, испарения жидкости; сравнение результатов эксперимента и расчета показало удовлетворительное согласование данных;

- расчетно-теоретическая часть работы построена на известных научных методах расчета;

**Личный вклад соискателя состоит в:**

- разработке и верификации модели рабочего процесса в КС РДМТ с учетом внутреннего охлаждения жидким компонентом; критической оценке результатов;

- выявлении влияния параметров подачи компонентов топлива в КС на энергетические показатели эффективности РДМТ;

- выработке рекомендаций по совершенствованию рабочего процесса в КС рассматриваемого РДМТ и РДМТ близкой конфигурации;

На заседании 09 октября 2017 года диссертационный совет принял решение присудить Строкачу Е.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 28 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 21, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель

диссертационного совета

Равикович Юрий Александрович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Зуев Юрий Владимирович

09 октября 2017 г.