

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: Д 212.125.14

Соискатель: Куроедов Алексей Анатольевич

Тема диссертации: Исследование линейной неустойчивости рабочего процесса в энергетических установках твердого топлива

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Решение диссертационного совета по результатам защиты: На заседании 21 декабря 2018 года, протокол №19, диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Куроедову Алексею Анатольевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

Присутствовали: Красильников П.С. – *председатель*, Гидаспов В.Ю. – *ученый секретарь*, а также члены диссертационного совета: Холостова О.В., Бардин Б.С., Бишаев А.М., Буров А.А., Колесник С.А., Косенко И.И., Котельников М.В., Никитченко Ю.А., Овчинников М.Ю., Ревизников Д.Л., Формалев В.Ф., Ципенко А.В., Шамолин М.В.

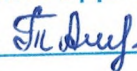
Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14, к.ф.-м.н., доцент



В.Ю. Гидаспов



И.о. начальника отдела УДС МАИ
Т.А. Аникина



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.14 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 21 декабря 2018 г. № 19.

О присуждении Куроедову Алексею Анатольевичу, гражданину РФ,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование линейной неустойчивости рабочего процесса в энергетических установках твердого топлива» по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите «19» октября 2018 года, протокол № 13, диссертационным советом Д 212.125.14 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, приказы Минобрнауки РФ: о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012.

Соискатель Куроедов Алексей Анатольевич 1990 года рождения, окончил в 2013 году факультет аэрофизики и космических исследований федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по специальности «Прикладная математика и физика».

В период с 2013-го по 2017 г. являлся аспирантом Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ).

Работает в Государственном научном центре Российской Федерации – федеральном государственном унитарном предприятии «Исследовательский

центр им. М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») в должности научный сотрудник.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ) на кафедре тепловых процессов.

Научный руководитель – заместитель заведующего кафедрой тепловых процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», доктор технических наук, профессор, Борисов Дмитрий Марианович.

Официальные оппоненты:

1. Рашковский Сергей Александрович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН).

2. Иванов Игорь Эдуардович, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения», г. Реутов, в своем положительном заключении, подписанном главным научным сотрудником, доктором технических наук В.В. Горским, заместителем начальника отдела, кандидатом физико-математических наук А.В. Плюсниним, ученым секретарем секции НТС,

кандидатом физико-математических наук Л.А. Бондаренко и утвержденном первым заместителем генерального директора – заместителем генерального конструктора АО «ВПК «НПО машиностроения», генеральным конструктором Оперативно-тактического вооружения ВМФ, доктором технических наук А.А. Дергачёвым, указала, что диссертация представляет собой законченную научную работу в области течений сжимаемых сред в каналах сложной формы с проницаемыми стенками. Тематика диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертация удовлетворяет всем требованиям Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней» и заслуживает положительной оценки, а её автор, Куроедов Алексей Анатольевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

На диссертацию поступили отзывы:

Отзыв на диссертацию ведущей организации.

Замечания по диссертации:

1. Во второй главе диссертации недостаточно полно изложен численный метод решения дифференциальных уравнений в части формирования и заполнения глобальной массовой матрицы, матрицы жесткости и потоковой матрицы.

2. В тексте не отражено влияние переходных процессов на акустические возмущения в камере сгорания.

3. В третьей главе диссертации на рисунках 3.11-3.17 следовало бы указать погрешности определения результатов, полученных другими исследователями.

4. текст диссертации содержит значительное количество опечаток.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Рашковского Сергея Александровича.

Замечания по диссертации:

1. Автор ограничился лишь линейным анализом акустического процесса в РДТТ, который позволяет определить только критические условия возникновения акустической неустойчивости, но не позволяет рассчитать её влияние на внутрибаллистические и тяговые характеристики РДТТ. В реальных конструкциях по ряду причин не удастся полностью устранить акустическую неустойчивость. Поэтому возникает необходимость определения внутрибаллистических параметров РДТТ с учетом незатухающих акустических колебаний и их влияние на кривую давления, в частности, амплитуды этих колебаний и их влияние на кривую давления. Такой анализ требует решения нелинейной задачи, которая в данной работе не рассматривается.

2. В работе проведен анализ акустической устойчивости для нескольких РДТТ с разными конструкциями зарядов. Показано, что для одних конструкций (двухкамерная установка и многосопловая ЭУ) рабочий процесс является неустойчивым в течение всего времени работы, в то время как для ЭУ большого удлинения, рабочий процесс вначале является устойчивым, а затем происходит потеря устойчивости. Этот вывод представляет практический интерес, однако в данной работе, отсутствует экспериментальное подтверждение полученных расчетных результатов, что не позволяет оценить их достоверность.

3. Результаты диссертационной работы Куроедова А.А. опубликованы в ведомственном журнале Труды МАИ. Несмотря на то, что данный журнал входит в список ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, было бы полезно опубликовать результаты диссертации в международных научных журналах, индексируемых в системах Web of Science и Scopus. Это позволило бы более

широкой научной общественности ознакомиться с результатами данной работы.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, к.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Иванова Игоря Эдуардовича.

Замечания по диссертации:

1. Представление некоторых источников в списке литературы не соответствует ГОСТ.

2. Введение некоторых аббревиатур предшествует их расшифровке, что усложняет восприятие текста.

3. Имеются опечатки в текстах автореферата и диссертации.

4. Некоторые пункты литературного обзора, представленные в первой главе диссертации, не имеют прямого отношения к исследованию автора.

5. Главе 2 при сравнении результатов расчета с использованием энергетической методики не представлены экспериментальные значения коэффициентов затухания.

6. Из текста диссертации неясно, с какой погрешностью определялись значения акустической проводимости и функции отклика, экспериментально полученные другими авторами.

7. В диссертации не указано, как влияет погрешность определения значений акустической проводимости на значения коэффициента затухания для конкретных установок.

8. В четвертой главе диссертации представлена всего одна тестовая задача для верификации численного метода.

На автореферат диссертации поступило 8 отзывов.

1. Руководитель группы АО «ФНПЦ Алтай», доктор технических наук, старший научный сотрудник Р.В. Рафиков, начальник лаборатории АО «ФНПЦ Алтай», кандидат технических наук Е.Е. Порубов.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. В автореферате высказано предположение о том, что размер зоны, в которой происходит разложение топлива и дальнейшее химическое взаимодействие ПС, существенно меньше радиуса проточной части КС, но при этом не приведены расчетные оценки или данные замеров размеров этой зоны.

2. Отсутствуют пояснения относительно погрешностей определения нанесенных на графики коэффициентов затухания и других величин (с. 17).

3. Было бы полезно обозначить направление дальнейших исследований проблемы.

4. Не приведены экспериментальные диаграммы давления с пиками возмущений в установках, полученных при отработке экспериментальной части методики.

5. Используются не общепринятые в отрасли термины и фразы, например, «...размещается топливо с цилиндрическим каналом» (с 17 13 а/р); S_T – площадь горения топлива (с.13 а/р); ЭУТТ с каналом сложной формы, в котором используется безметальное топливо; «полуаналитическая» методика (в отрасли используется термин «полуэмпирический» метод (методика).

2. Заместитель главного конструктора по НИР АО «МКБ «Искра», кандидат технических наук, доцент А.Ю. Норенко, начальник отдела инновационного развития АО «МКБ «Искра», кандидат технических наук М.А. Тихомиров.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. В автореферате упоминается об определении действительной части значения акустической проводимости, но ничего не сказано о влиянии её мнимой части на расчет устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ.

2. Для наглядности полученных результатов и подтверждения справедливости выводов, полученных при использовании энергетической

методики, целесообразно представить экспериментальные данные, если таковые имеются (рис. 3 автореферата).

3. Главный научный сотрудник АО «Корпорация «МИТ», доктор технических наук, профессор В.П. Георгиевский, ведущий инженер-конструктор АО «Корпорация «МИТ», кандидат технических наук Б.К. Терпогосова.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. В тексте автореферата отсутствуют методические рекомендации по анализу неустойчивости рабочего процесса в зарядах, имеющих нецилиндрическую канальную поверхность горения, например, зарядах торцевого горения или зарядах с несимметричным расположением компенсирующих элементов и др.

2. Заряды современных энергетических установок, выполненные прочноскрепленными с корпусами из композиционных материалов, обладают деформативными свойствами, влияющими на процессы, протекающие в камере сгорания ЭУ. Этот аспект не нашел отражения в тексте автореферата.

4. Начальник лаборатории ФГУП «ФЦДТ «Союз» А.В. Федорычев.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. В работе представлены результаты измерения акустической проводимости зоны горения для низкотемпературного безметалльного топлива и металлизированного топлива. Далее эти результаты использованы для верификации методики на экспериментальных данных, полученных Харрисом и Бломшильдом для шести ЭУТТ на «схожих топливах». Поскольку акустическая проводимость зоны горения и отклик скорости горения на возмущения давления зависят от рецептурного состава топлива, дисперсности компонентов (окислителя и металлического горючего),

химической природы связующего, скорости горения топлива, её чувствительности к изменениям давления и температуры и др., то утверждение о «схожести топлив» требует дополнительного обоснования. Харрис и Бломшильд работали с топливами, скомпонованными на основе связующего НТРВ, которое в России не используется.

2. Требуется дополнительное обоснование возможности сведения к соосному расположению камер сгорания двухкамерного РДТТ при их V-образном расположении в реальной конструкции, принятого автором в связи с осесимметричной реализацией предлагаемого метода расчета.

5. Начальник ЦТА ФГУП ЦНИИмаш, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Р.В. Ковалев, главный научный сотрудник ЦТА ФГУП ЦНИИмаш, доктор технических наук, профессор Ю.М. Липницкий.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Влияние конденсированной фазы продуктов сгорания твердого топлива учтено упрощенно, а именно, через поправочный коэффициент.

2. В тексте автореферата не отражено, как результат экспериментального определения акустической проводимости используется для расчета устойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, в которых имеет место падение акустической волны под углом к нормали поверхности горения топлива.

3. Предложенная методика не может быть использована для исследования поперечной неустойчивости.

4. Экспериментальная установка (импульсная Т-камера) не может быть использована для определения свойств зоны горения при высоких частотах реализуемых колебаний.

5. В работе не показано влияние догорания частиц конденсированной фазы в потоке на устойчивость рабочего процесса в ЭУТТ.

6. Главный конструктор – начальник проектно-конструкторского отделения АО «МКБ «Факел» Е.Г. Болотов, заместитель генерального конструктора АО «МКБ «Факел» А.В. Болев, начальник бригады отдела 80 АО «МКБ «Факел» Б.Н. Тучков.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Не ясно, в чем состоят принципиальные отличия данной методики от существующих (ОКБ «Союз» - КНИТУ КАИ им. Туполева, Казань; ПГУ г. Пермь и др.) с точки зрения практической значимости.

2. Не обозначена область применения данной методики для ракетных двигателей на твердом топливе различных конструктивных схем.

3. Отсутствует возможность определения одного из самых важных параметров процесса – амплитуды колебаний давления (тяги) в камере и её зависимость от времени.

4. Не рассмотрена возможность исследования влияния конструктивно-компоновочных параметров РДТТ и зарядов твердого топлива (ЗТТ) на параметры неустойчивости (степень сдвига сопла формы ЗТТ и т.п.). Не исследованы методы борьбы с явлением неустойчивости.

7. Главный специалист АО «НПК «КБМ», доктор технических наук А.С. Трушков, ученый секретарь АО «НПК «КБМ», доктор технических наук В.Г. Новиков.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Из текста автореферата не ясно, чем был обусловлен выбор именно импульсной Т-камеры в качестве устройства для измерения акустической проводимости.

2. В автореферате не представлено никаких данных по результатам верификации самого численного метода.

8. Заместитель генерального конструктора по проектированию изделий и комплексов АО «ГРЦ Макеева» С.Ф. Молчанов, ведущий научный сотрудник АО «ГРЦ Макеева», кандидат физико-математических наук С.А. Биткин.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. В автореферате следовало бы дать определение акустической проводимости зоны горения и пояснить физический смысл функции отклика зоны горения по давлению.

2. Четвертая глава диссертации могла быть дополнена практическими рекомендациями по обеспечению устойчивости рабочего процесса в рассмотренных энергоустановках.

3. Нельзя не отметить замеченные неточности, в частности размерность универсальной газовой постоянной на стр. 9, формулы для осреднения на стр. 18, заголовок над последней парой графиков на стр.17.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в области тем, затрагиваемых в диссертационном исследовании.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» (ИПМех РАН) Рашковский Сергей Александрович – автор более 60 работ. Область научных интересов: термогазодинамика и внутренняя баллистика ракетных двигателей на твердом топливе, стационарное и нестационарное горение твердых ракетных топлив, агломерация частиц алюминия и бора при горении твердых ракетных топлив, воспламенение и горение частиц алюминия и бора, турбулентное горение газов, горение гетерогенных и дисперсных систем, основания квантовой механики, статистическая физика, нелинейные

системы, применение методов термодинамики и статистической физики к описанию нефизических систем. Рашковским С.А. создано новое научное направление: статистическое моделирование структуры и процессов горения гетерогенных конденсированных смесей (ГКС), в основе которого лежат методы статистической физики и теории случайных процессов, рассматривающее с единых статистических позиций процессы, происходящие при горении ГКС, и влияние структуры ГКС на особенности протекания различных стадий горения ГКС.

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Иванов Игорь Эдуардович – автор более 70 работ. Область научных интересов: численные методы механики сплошных сред, струйные течения молекулярных и сплошных сред, вычислительная гидродинамика.

Выбор ведущей организации – АО «ВПК «НПО машиностроения» – обусловлен ее положением как одной из передовых организаций, проводящих исследования, эксперименты, разработку и производство новейших видов военной техники. Является одним из ведущих ракетно-космических предприятий России. АО «ВПК «НПО машиностроения» осуществляет военно-техническое сотрудничество с зарубежными партнерами.

Соискатель имеет 4 опубликованных научных работ по теме диссертации, из них 3 работ опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Большинство работ опубликовано в соавторстве, при этом вклад соискателя был определяющим, а опубликованные результаты получены либо лично

соискателем, либо при его непосредственном участии. В опубликованных работах излагаются основные положения диссертационной работы: разработка методики моделирования распространения возмущений давления малой амплитуды в осесимметричном канале переменного сечения с проницаемыми стенками, заполненным газовой средой; разработка экспериментальной установки для определения акустических свойств зоны горения топлива; результаты экспериментальных исследований акустической проводимости безметалльных и металлизированных составов для различных частот колебаний давления и среднего давления в КС; расчет устойчивости рабочего процесса в различных ЭУТТ, работающих на безметалльных и металлизированных топливах; модификация энергетической методики определения неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, связанного с особенностями усреднения рабочих параметров по времени в объеме КС ЭУТТ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Куроедов А.А., Лаптев И.В., Борисов Д.М. Влияние конденсированной фазы на акустическую неустойчивость в энергетических установках на твердом топливе, Труды МАИ, Выпуск № 90, 2016.
2. Куроедов А. А., Борисов Д. М. Влияние способа усреднения рабочих параметров энергетических установок на твердом топливе на значение коэффициента затухания акустических колебаний, Труды МАИ, Выпуск № 94, 2017.
3. Куроедов А.А., Борисов Д.М., Семёнов П.А. Определение акустической проводимости зоны горения безметалльных и металлизированных энергетических конденсированных систем, Труды МАИ, Выпуск №98, 2018.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **разработана** методика определения продольной линейной неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, в которую входит методика экспериментального определения акустической проводимости зоны горения топлива;

– **сформулирована** задача квазистационарного течения вязкого теплопроводящего газа в осесимметричном канале переменного сечения с проницаемыми стенками, а также задача распространения колебаний давления малой амплитуды, накладываемых на данное квазистационарное течение;

– **получены** зависимости действительной части акустической проводимости и функции отклика зоны горения по давлению для двух типов топлив в диапазоне частот реализуемых колебаний и среднего давления;

– **получены** результаты численного моделирования пространственного распределения колебаний давления и коэффициентов затухания первых продольных мод колебаний продуктов сгорания в камерах шести тестовых энергетических установок (эксперименты Харриса и Бломшильда);

– **получены** результаты численного моделирования устойчивости первой продольной моды колебаний давления в установке большого удлинения, двухкамерной установке, работающих на металлизированном топливе, а также двухкамерной многосопловой установки, работающей на безметальном топливе;

– **показана** возможность перехода рабочего процесса в трех рассмотренных установках на неустойчивые режимы в указанных временных интервалах;

Практическая ценность результатов работы заключается в создании комплексной методики исследования линейной неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, включающей в себя методику экспериментального

определения акустических свойств зоны горения. Разработанная экспериментальная методика определения акустических свойств топлив позволяет определять акустическую проводимость и функцию отклика зоны горения по давлению в широком диапазоне частот реализуемых колебаний. Применение комплексной методики позволило установить возможность перехода на неустойчивые режимы двухкамерной многосопловой ЭУТТ при использовании безметалльного топлива.

Достоверность результатов исследования. Результаты работы получены с помощью совместного использования математического моделирования и экспериментальных исследований, что позволяет обеспечить всесторонний анализ рассматриваемых задач. Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением результатов расчета, полученных по предложенной методике, с данными экспериментальных исследований и результатами расчётов, проведённых с использованием других методик. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается тщательным планированием эксперимента и качественным экспериментальным оборудованием.

Личный вклад. Автором разработана методика определения продольной линейной неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ, в которую входит методика экспериментального определения акустической проводимости зоны горения топлива. Осуществлена верификация методики для шести ЭУТТ, работающих на безметалльных составах. Определены акустическая проводимость и функция отклика зоны горения по давлению для безметалльного и металлизированного топлив с использованием разработанной экспериментальной установки. Автором проведены расчеты устойчивости двух ЭУТТ, использующие металлизированное топливо. Проведены расчеты устойчивости двухкамерной ЭУ, работающей на безметалльном топливе. Предложена модификация энергетической методики по определению линейной неустойчивости рабочего процесса в ЭУТТ.

Диссертация удовлетворяет пунктам 9-14 постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней», так как является самостоятельно выполненной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи моделирования устойчивости волновых структур в камерах сгорания ЭУТТ.

На заседании «21» декабря 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Куроедову А.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за 14, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Председатель диссертационного совета
Д 212.125.14, д.ф.-м.н., профессор

П.С. Красильников

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.14, к.ф.-м.н., доцент

В.Ю. Гидаспов

