

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 15 апреля 2016 года публичной защиты диссертации Рулёвой Евгении Валерьевны «Теоретическое и экспериментальное исследование влияния массового уноса на тепловую защиту при пульсации газового потока» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Время начала заседания: 14.30

Время окончания заседания: 16.30

На заседании присутствовали 19 из 26 членов диссертационного совета, из них 4 доктора наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

1.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Васенин Игорь Михайлович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Пикушак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
6.	Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7.	Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
8.	Герасимов Александр Владимирович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
9.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
10.	Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
11.	Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
12.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
13.	Кульков Сергей Николаевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
14.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
15.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
16.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
17.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
18.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
19.	Щрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

**Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – 1) диссертационный совет принял решение присудить Е.В. Рулёвой учёную степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13**  
**на базе федерального государственного автономного образовательного**  
**учреждения высшего образования**  
**«Национальный исследовательский Томский государственный университет»**  
**Министерства образования и науки Российской Федерации**  
**по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук**  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 15.04.2016 г., № 254

О присуждении **Рулёвой Евгении Валерьевне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Теоретическое и экспериментальное исследование влияния массового уноса на тепловую защиту при пульсации газового потока»** по специальности **01.04.14** – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 05.02.2016 г., протокол № 251, диссертационным советом **Д 212.267.13** на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 203-161 от 08.02.2008 г.).

Соискатель **Рулёва Евгения Валерьевна**, 1988 года рождения.

В 2010 году соискатель окончила государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет».

В 2014 году соискатель очно окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности инженера лаборатории 91 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре физической и вычислительной механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научные руководители – **Голованов Александр Николаевич**, доктор технических наук (скончался); **Якимов Анатолий Степанович**, доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра физической и вычислительной механики, профессор.

Официальные оппоненты:

**Пахомов Максим Александрович**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория термогазодинамики, ведущий научный сотрудник

**Калинина Анна Павловна**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория 4. Физика быстропротекающих процессов, старший научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Акционерное общество «**Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева**», г. Миасс, в своем положительном заключении, подписанном **Молчановым Сергеем Филипповичем** (заместитель генерального конструктора, председатель секции № 1 НТС), **Хлыбовым Владимиром Ильичом** (доктор физико-математических наук, отдел аэрогазодинамики и теплообмена, начальник отдела), **Мокиным Юрием Александровичем** (доктор физико-математических наук, доцент, отдел аэрогазодинамики и теплообмена, главный научный сотрудник), указала, что создание конструкций из теплозащитных материалов, способных работать в области высоких температур и больших тепловых потоков, является важной проблемой,

стоящей перед разработчиками авиационной, космической, ракетной и других видов техники, но прямое (натурное) экспериментальное исследование теплофизических и газодинамических процессов, протекающих, например, при входе космического аппарата в атмосферу, представляет огромные трудности и требует больших экономических затрат, поэтому тема диссертации Е.В. Рулёвой, посвященная математическому и физическому моделированию задач тепловой защиты применительно к космическим и другим летательным аппаратам является актуальной. Диссертация в целом вносит значительный вклад в развитие моделирования и понимания процессов тепломассообмена в композиционных материалах при влиянии малых энергетических возмущений. Полученные в работе теоретико-экспериментальные данные исследований композиционных материалов и систем могут быть использованы при разработке и проектировании новых способов и устройств тепловой защиты конструктивных элементов летательных аппаратов различного типа и перспективных изделий ракетно-космической техники.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 8 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 4 (из них 2 статьи в журналах, переводные версии которых индексируются Web of Science), 4 патента на изобретения. Общий объем работ – 4,12 п.л., личный вклад автора – 1,32 п.л.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации, опубликованные 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:

1. **Степанова (Рулёва) Е. В.** Математическое моделирование процесса тепломассообмена в теплозащитном покрытии при пульсации газового потока / Е. В. Степанова (Рулёва), А. С. Якимов // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 2. – С. 236-242. – 0,43 / 0,13 п.л.

*в переводной версии журнала:*

**Stepanova (Ruleva) E. V.** Mathematical simulation of heat and mass transfer in a heat resistant coating with gas flow fluctuations / E. V. Stepanova (Ruleva), A. S. Yakimov // High Temperature. – 2015. – Vol. 53, is. 2. – С. 228–233.

2. Голованов А. Н. Моделирование процесса теплообмена в системах пористого охлаждения при пульсациях газового потока / А. Н. Голованов, **Е. В. Рулёва**, А. С. Якимов // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49, № 6. – С. 948–952. – 0,46 / 0,14 п.л.

*в переводной версии журнала:*

Golovanov A. N. Modeling the heat and mass exchange process in the systems of porous cooling with gas flow pulsations / A. N. Golovanov, **E. V. Ruleva**, A. S. Yakimov // High Temperature. – 2011. – Vol. 49, is 6. – С. 917–921.

3. Голованов А. Н. О влиянии периодических пульсаций газа-охлаждителя на характеристики теплообмена в системах пористого охлаждения / А. Н. Голованов, **Е. В. Рулёва** // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 2(14). – С. 85–90. – 0,22 / 0,1 п.л.

4. **Рулёва Е. В.** Тепломассообмен стенки и высокотемпературного потока газа при наличии вдува газа-охлаждителя через пористые материалы / Е. В. Рулёва, А. Н. Голованов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2010. – № 2(10). – С 88–93. – 0,22 / 0,11 п.л.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **Г.Т. Алдошин**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой А 7 «Теоретическая механика и баллистика» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, *без замечаний.*
2. **В.В. Горский**, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник АО «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения», г. Реутов, *с замечаниями:* В автореферате не уделено должного внимания вопросу, связанному с определением коэффициента проницаемости тепловой защиты; отсутствие таких данных создает серьезные препятствия для исследования процесса фильтрации коксовых газов в теплозащитных материалах типа углепластика в рамках закона Дарси. Если такие данные известны автору, то следовало бы их привести и указать на обоснованность их использования. Аналогичное замечание можно сделать и по данным, которые автор использует для описания кинетики гетерогенных химических процессов, протекающих на поверхности углеродных материалов. Экспериментальные данные по этому вопросу,

полученные различными исследователями, существенно расходятся между собой, поэтому в автореферате следовало бы указать на обоснованность применения приведенных в нем соответствующих кинетических констант. 3. **А.Н. Субботин**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры парогенераторного строения и парогенераторных установок Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с вопросами*: чем обусловлено время проведения эксперимента (рис. 15, 16)? какова физика процесса малых энергетических возмущений в инертной к-фазе? как найти скорость пиролиза  $(\rho v)_{1w}$ ? какими уравнениями описывается течение в математических моделях? как оно создается? как зачеканивались термопары в эксперименте, и как эта процедура может повлиять на точность измерений? на рисунке 15, 16 указана шероховатость равная нулю, но непонятно, это зеркальная поверхность или естественная шероховатость? 4. **Г.Г. Волокитин**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной механики и материаловедения Томского государственного архитектурно-строительного университета, *с вопросами*: когда целесообразно использовать двухтемпературный режим теплообмена в пористом материале? почему прогрев углепластика одномерный и используется линейный закон Дарси? какой вклад пульсаций газа в потоке или в пористой стенке на интенсивность процесса тепло- и массообмена в композиционном материале? какова физическая природа возникающих колебаний? *и с замечанием*: при моделировании работы тепловой защиты рассмотрен только вдув воздуха и воды и не изучены возможности применения других охладителей, которые могут оказаться эффективными. 5. **В.В. Белов**, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией распространения оптических сигналов Института оптики атмосферы им. В.Е Зуева СО РАН, г. Томск, *с вопросами*: почему в математических моделях используется однотемпературный режим тепломассообмена? каков количественно вклад малых периодических возмущений в интенсивность процесса тепломассообмена в теоретических и экспериментальных исследованиях?

В отзывах отмечается, что тепловая защита летательных аппаратов и ракетных двигателей при движении в высокоскоростных и высокоэнталийных потоках является фундаментальной проблемой современной ракетно-космической техники. К числу нерешенных проблем следует отнести влияние функционирования

активной и пассивной защиты различных нестационарных эффектов, возникающих при обтекании поверхности летательного аппарата высокоскоростным потоком газа: пульсации давления в отрывных зонах и скачках уплотнения за ударными волнами, неравновесность химических реакций и т.п. Кроме того, актуальным остается вопрос выяснения механизма влияния малых энергетических возмущений на системы тепловой защиты и появления возможности посредством этого управлять гидродинамическими характеристиками таких систем. В значительной степени это касается изучения физики процесса тепломассопереноса в условиях малых возмущений, чему посвящена большая часть настоящей диссертационной работы. Автором получен ряд новых научных результатов, включая экспериментальные и теоретические данные о характере изменения параметров тепломассообмена в условиях воздействия малых энергетических возмущений, по результатам которых было предложено несколько новых способов повышения эффективности тепловой защиты летательных аппаратов. Полученные в работе экспериментально-теоретические данные исследований различных материалов и систем могут быть использованы при проектировании и разработке новых способов и устройств тепловой защиты конструктивных элементов летательных аппаратов различного типа. Теоретические положения и практические рекомендации могут быть использованы в учебном процессе вузов при решении задач тепломассообмена, тепловой защиты.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **М. А. Пахомов** является специалистом в области численного моделирования тепломассообмена в двухфазных течениях, в том числе применительно к тепловой защите; **А. П. Калинина** – специалист в области газодинамики трансзвукового обтекания поверхностей при наличии локальной сверхзвуковой зоны и замыкающего скачка при импульсном периодическом подводе энергии; **Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева** является одним из крупнейших научно-конструкторских центров России по разработке и испытанию ракетно-космической техники, на базе которого активно развиваются исследовательские направления, связанные с теорией теплообмена, физической гидрогазодинамикой, тепломассопереносом.

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

*разработан и запатентован* экспериментальный комплекс для изучения взаимодействия теплозащитного покрытия с высокотемпературным газовым потоком в условиях воздействия малых энергетических возмущений;

*исследованы* характеристики теплообмена различных систем тепловой защиты при воздействии на них малых энергетических возмущений;

*установлено*, что наличие малых энергетических возмущений существенно влияет на эффективность активной тепловой защиты с использованием пористых материалов и вдува охладителя различного типа (вода, воздух) в пограничный слой;

*развит* гравиметрический метод непрерывного измерения массы в процессе воздействия на образец высокоэнтропийного набегающего потока, а так же методики термопарного измерения для исследования воздействия высокотемпературного потока на теплозащитный материал;

*получены* экспериментальные данные, характеризующие влияние шероховатости поверхности на теплообмен в системах пассивной тепловой защиты, тангенциальных и линейных вибраций на системы активной тепловой защиты;

*модифицирована* математическая постановка одномерной задачи термохимического разрушения поверхностных слоев композиционных материалов в условиях воздействия малых возмущений на базе математической модели пористой реагирующей среды;

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

в работе получены результаты, которые вносят вклад в развитие задач механики инертных и реагирующих сред, а именно:

*модернизирована* математическая модель А.М. Гришина для расчета характеристик термохимического разрушения композиционных материалов, а также математическая модель Гришина/Якимова для нахождения характеристик теплообмена в системах пористого охлаждения путем ввода модификаций, учитывающих малые энергетические возмущения;

*выполнена апробация* моделей на основе сравнения результатов численного моделирования с известными теоретическими решениями других исследователей;

*численно исследовано* влияние интенсивности малых энергетических возмущений на температуру и унос массы в системах активной и пассивной тепловой защиты.

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

полученные в диссертационной работе экспериментальные и теоретические результаты исследования механизма влияния малых энергетических возмущений на характеристики теплообмена могут быть использованы при разработке новых способов и устройств тепловой защиты конструктивных элементов летательных аппаратов;

знание о характере воздействия малых возмущений различного рода на системы тепловой защиты конструктивных элементов летательных аппаратов позволит управлять гидродинамическими и тепловыми характеристиками таких систем;

результаты экспериментального исследования термохимического разрушения композиционных материалов типа «углепластик» и «стеклопластик» могут быть использованы для выбора наиболее перспективных и надежных образцов для использования их в системах тепловой защиты различного типа;

результаты диссертационной работы получены при выполнении ряда научно-исследовательских проектов, в том числе грант ФАО «Развитие научного потенциала высшей школы 2009-2011)», РН 2.1.1/2269 и гос. задание №9.1024.2014/к Минобрнауки России.

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.** Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в учреждениях РАН и бюджетных учреждениях, таких как Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург), АО «Военно-

промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения» (г. Реутов), АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара), Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина (г. Химки), АО «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева» (г. Миасс) и т.д.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

*использованы* корректные физические и математические постановки задач, основанные на классических подходах механики многофазных реагирующих сред и теплофизики;

*проведены* в лабораторных условиях экспериментальные исследования с использованием апробированных современных измерительных методик и оборудования;

*имеется* хорошее согласование полученных теоретических и экспериментальных результатов с данными других авторов, опубликованными в научной литературе.

**Новизна результатов диссертационного исследования** заключается в том, что разработан и запатентован испытательный комплекс для изучения взаимодействия теплозащитного покрытия с высокотемпературным газовым потоком в условиях малых энергетических возмущений; проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами аналитического решения уравнений одномерной однотемпературной математической модели Ю.В. Полежаева для систем пористого охлаждения при сильных вдувах; показана восприимчивость системы пористого охлаждения к воздействию малых энергетических возмущений; модифицирована математическая модель Гришина–Якимова для расчета характеристик теплообмена в системах пористого охлаждения при наличии малых энергетических возмущений; модифицирована математическая модель пористого реагирующего тела А.М. Гришина для расчета характеристик термохимического разрушения теплозащитного материала с учетом малых энергетических возмущений; запатентовано 3 способа тепловой защиты.

**Личный вклад автора заключается в:** непосредственном участии в выполнении всех экспериментов, анализе результатов экспериментальных исследований и численного моделирования, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту, написании статей по теме диссертации. Постановка задач кандидатской диссертации и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем. Вклад диссертанта в основные результаты исследований определяющий. Все результаты совместных работ и выводы, включенные в диссертацию, получены автором лично. Представление изложенных в работе результатов согласовано с соавторами.

Диссертация соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи установления закономерностей теплофизических процессов, протекающих при взаимодействии набегающего высокосубзвукового потока с покрытиями различного типа, имеющей значение для развития теплофизики в области более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах в физических системах.

На заседании 15.04.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить **Рулёвой Е.В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 4 доктора наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – 1.

Заместитель председателя  
диссертационного совета  
Ученый секретарь  
диссертационного совета



Христенко Юрий Федорович

Пикущак Елизавета Владимировна

15 апреля 2016 г.