

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 11 декабря 2015 года публичной защиты диссертации Порязова Василия Андреевича «Математическое моделирование горения металлизированных твердых топлив с учетом процессов в газовой фазе» 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: 16.45

На заседании присутствовали 24 из 26 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

1.	Васенин Игорь Михайлович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
2.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
3.	Пикущак 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.	Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7.	Бубенчиков Алексей Михайлович	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.	Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
16.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
17.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
18.	Смоляков Виктор Кузьмич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
19.	Старченко Александр Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
20.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
21.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
22.	Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
23.	Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
24.	Якутенко Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

**Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор Васенин Игорь Михайлович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 24, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить В.А. Порязову 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 11.12.2015 г., № 242

О присуждении **Порязову Василию Андреевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Математическое моделирование горения металлизированных твердых топлив с учетом процессов в газовой фазе»** по специальности **01.04.14** – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 02.10.2015 г., протокол № 224, 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 **Порязов Василий Андреевич**, 1988 года рождения.

В 2012 году соискатель окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

В 2015 году соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории проблем опасных космических объектов, по совместительству – в должности старшего лаборанта кафедры математической физики в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

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

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Крайнов Алексей Юрьевич**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра математической физики, профессор.

Официальные оппоненты:

**Лежнин Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория проблем тепломассопереноса, главный научный сотрудник

**Кузнецов Гений Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра теоретической и промышленной теплотехники, заведующий кафедрой

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанном **Готовым Олегом Григорьевичем** (кандидат физико-математических наук, лаборатория горения конденсированных систем, заведующий лабораторией) и **Зарко Владимиром Егоровичем** (доктор физико-математических наук, лаборатория горения конденсированных систем, главный научный сотрудник), указала, что актуальность темы диссертации обусловлена тем, что имеющиеся на данный момент математические модели горения металлизированных смесевых твердых топлив концентрируются, как правило, на моделировании агломерации металлических частиц в к-фазе и на поверхности горения и не учитывают

особенности процессов, протекающих в газовой фазе над поверхностью горения, и отсутствуют модели, позволяющие оценить величины скорости горения металлизированных твердых топлив. Научная новизна работы заключается в разработке оригинальной физико-математической модели горения металлизированных твердых топлив, учитывающей экзотермическую химическую реакцию, конвекцию и диффузию в газовой фазе, нагрев, горение и ускорение частиц металла в потоке газа, а также реализации нестационарной модели горения пороха. Результаты и выводы относительно влияния дисперсности порошка алюминия на величину линейной скорости горения представляют практический и научный интерес. Полученные в диссертационной работе результаты носят фундаментальный характер и могут быть использованы в научно-исследовательских организациях для анализа влияния компонентного состава твердого топлива на величину линейной скорости горения.

Соискатель имеет 9 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 9 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 3 (из них 1 статья в российском журнале, переводная версия которого включена в Scopus), в сборнике научных трудов – 1, в сборниках материалов всероссийских и международных научных конференций – 5. Общий объем работ – 3,46 п.л., авторский вклад – 1,74 п.л.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1. **Poryazov V. A.** Simulating the combustion of n powder with added finely divided aluminum / V. A. Poryazov, A. Yu. Krainov, D. A. Krainov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2015. – № 1 (88). – P. 94–103. – 1,04 / 0,52 п.л. – DOI : 10.1007/s10891–015–1171–0.

2. **Порязов В. А.** Влияние дисперсности частиц алюминия в газовой фазе на скорость горения смесевых твердых топлив / В. А. Порязов // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2015. – № 1(33). – С. 96–105. – 0,64 / 0,64 п.л.

3. **Порязов В. А.** Математическое моделирование горения смесевых составов, содержащих мелкодисперсный алюминий / В. А. Порязов, А. Ю. Крайнов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9/3. – С. 196–199. – 0,46 / 0,23 п.л.

На автореферат поступило 9 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **М. В. Комарова**, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, *без замечаний*.  
2. **П. А. Стрижак**, д-р физ.-мат. наук, доц., заведующий кафедрой автоматизации теплоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями*: не приведены качественные и количественные оценки экологических характеристик рассматриваемых видов топлив, хотя при описании актуальности работы затрагивается этот вопрос; не указаны размерности при перечислении символов; не представлено обоснование выбора методов численного моделирования и оценки достоверности результатов теоретических исследований; не проанализирован вклад определяющей стадии иницирования горения в исследуемые автором процессы. 3. **А. С. Трушков**, д-р техн. наук, профессор кафедры информатики Государственного социально-гуманитарного университета, г. Коломна, *с замечаниями*: не представлены сравнения результатов расчетов по представленной модели с результатами, полученными по феноменологическим моделям горения порохов; не описана методика решения задачи о погасании пороха при сбросе давления; есть замечания к оформлению. 4. **О. В. Глазков**, канд. техн. наук, заведующий отделом технологии добычи Томского научно-исследовательского и проектного института нефти и газа, *с замечаниями*: указано, что модели, учитывающие влияние металлических добавок на процессы горения твердых топлив разработаны недостаточно, но не указано, какие недостатки существующих моделей требуют доработки; не приведены данные о реальном распределении частиц порошка по размерам и не указано, на основе чего выбрана двухфракционная модель; указано на хорошее согласование результатов расчётов по модели замороженной воды с алюминием и гелеобразной воды с алюминием с известными результатами экспериментальных исследований, однако не дано объяснений наблюдаемых

отличий наклона кривой и не приведена оценка погрешности наблюдаемых отклонений. 5. **А. Р. Самборук**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета, *с замечанием*: отсутствует учет эффекта агломерации на поверхности горения. 6. **В. К. Булгаков**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры «Прикладная математика» Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, *с замечанием* к оформлению. 7. **А. В. Сергеев**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, и **Д. А. Ягодников**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, *с замечаниями*: отсутствие собственных экспериментальных данных затрудняет оценку корректности представленной модели; не ясно, ведется ли учет реакций в конденсированной фазе при реализации модели нестационарного горения топлива Н; вызывает неудобство отсутствие сокращений и условных обозначений, используемых автором. 8. **А. И. Сафронов**, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика» Тольяттинского государственного университета, *с замечанием*: использован неудачный термин «безметалльные» ТРТ. 9. **А. Г. Егоров**, д-р техн. наук, проф., директор НОЦ «Физика горения энергоемких материалов» Тольяттинского государственного университета, *с замечаниями*: не рассмотрены известные на сегодняшний день модели агломерации, что, возможно, позволило получить замкнутую модель горения алюминизированных смесевых твердых топлив; не рассматривается эффект недогорания агломератов частиц в потоке газа.

В отзывах отмечается, что задачи, поставленные в диссертационном исследовании В.А. Порязова, являются актуальными для решения научно-исследовательских и технологических задач в области разработки и проектирования высокоэнергетических конденсированных систем, использующих в качестве компонентов, в том числе и нанодисперсные порошки металлов, для прогнозирования скорости горения которых необходимо проводить предварительный расчетно-теоретический анализ термодинамических свойств и макрокинетических процессов. Автором разработана новая физико-математическая модель горения

металлизированных твердых топлив, учитывающая процессы, протекающие в газовой фазе над поверхностью горения, исследовано влияние добавки порошка алюминия в состав высокоэнергетических конденсированных веществ на скорость их горения, получен ряд новых научных результатов, включая установление влияния дисперсности частиц алюминия, вылетающих с поверхности горения, на величину линейной скорости горения. Полученные результаты имеют большое значение для теории и практики горения металлизированных топлив и могут быть применены для анализа различных высокоэнергетических материалов. Разработанная автором методика реализации нестационарной модели горения может быть использована для определения критериев устойчивости режимов горения при сбросе давления и может быть распространена на другие виды топлива.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **С. И. Лежнин** является крупным специалистом в области теплофизики и математического моделирования теплофизических процессов в многофазных гетерогенных средах, в частности, в вопросах тепломассообмена между фазами при наличии потоков высокой плотности энергии; **Г. В. Кузнецов** является признанным специалистом мирового уровня в вопросах тепломассообмена при высокоэнергетических взаимодействиях в двухфазных средах при фазовых превращениях, в вопросах тепловой защиты, зажигания и горения высокоэнергетических веществ; **Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН** является одним из ведущих институтов в области экспериментального и теоретического изучения вопросов горения высокоэнергетических веществ, в том числе металлизированных твердых ракетных топлив.

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

*продемонстрировано* существенное влияние размера частиц металла, вылетающего с поверхности горения в газовую фазу, на величину линейной скорости горения при заданном давлении над поверхностью горения;

*установлены* закономерности изменения скорости горения от давления и дисперсности частиц алюминия для топлива Н, смесового твердого топлива на основе перхлората аммония, замороженной смеси нанодисперсного алюминия с водой;

*показано*, что для расчета скорости горения металлизированных твердых топлив, при горении которых происходит агломерация исходных частиц металла на поверхности топлива, важна информация не только о кинетике химических реакций в газовой фазе, но и о полном распределении по размерам частиц металла, вылетающих с поверхности горения в газ.

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

в работе получены результаты фундаментального характера, которые вносят вклад в расширение существующих представлений о процессах тепломассопереноса, проходящих при горении металлизированных конденсированных высокоэнергетических веществ;

*выявлена* ограниченная применимость моделей агломерации в задачах определения скорости горения металлизированных твердых топлив;

*численно исследованы* зависимости величины линейной скорости горения от давления и размера частиц алюминия топлива Н, смесового твердого топлива на основе перхлората аммония, замороженной смеси нанодисперсного алюминия с водой, смеси ультрадисперсного алюминия с гелеобразной водой, а также устойчивость горения топлива Н в зависимости от величины и скорости сброса давления;

*исследованы* закономерности влияния размеров частиц алюминия, вылетающих с поверхности горения топлива, на величину линейной скорости горения.

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

разработанные математические модели и методика численного расчета скорости горения металлизированного твердого топлива могут быть использованы для моделирования процессов стационарного горения смесевых твердых топлив с добавлением частиц металла различной дисперсности;

реализованная математическая модель и методика численного расчета могут быть использованы для расчёта нестационарных режимов горения гомогенных топлив;

результаты работы могут быть использованы при разработке рецептур металлизированных твердых топлив с целью прогнозирования влияния

на линейную скорость горения закона распределения частиц металлического горючего по размерам на поверхности газификации и процентного содержания других исходных компонентов в составе топлива.

Работа частично выполнена в рамках НИР «Разработка моделей горения и взрыва газа, пыли, нестационарной аэродинамики, прикладного программного обеспечения для анализа процессов возникновения и развития очагов пожара, в том числе в сети выработок угольных шахт» (№ госрегистрации 01201257784); НИР «Разработка теоретических основ технологии проектирования новых материалов и энергетических установок» (№ госрегистрации 01201257785); ГЗ «Разработка фундаментальных физико-математических моделей горения высокоэнергетических материалов» № 10.1329.2014/К; гранта РФФИ 15-03-02578 А «Разработка математических моделей горения и расчет нестационарной скорости горения металлизированных твердых ракетных топлив».

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.** Полученные результаты могут быть использованы в учреждениях РАН и высших учебных заведениях, таких как Национальный исследовательский Томский государственный университет, Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (г. Новосибирск), Московский физико-технический институт (государственный университет), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, АО «ФНПЦ «Алтай» (г. Бийск) и др.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

*использованы* корректные физические и математические постановки задачи горения металлизированных твердых топлив, основанные на классических подходах;

*проведены* исследования сеточной сходимости, проверено выполнение законов сохранения массы и энергии при численном решении тестовых задач горения, на основании которых сделан вывод о применимости предложенного подхода для решения данного класса задач;

*проведено* сравнение полученных результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными другими авторами.

**Научная новизна результатов диссертационного исследования** заключается в том, что разработана оригинальная физико-математическая модель горения

металлизированного твердого топлива, учитывающая экзотермическую химическую реакцию, конвекцию и диффузию в газовой фазе, нагрев, горение и ускорение частиц металла в потоке газа, позволяющая проводить расчет величины линейной скорости горения. Реализована физико-математическая модель нестационарного горения топлива  $N$  на основе сопряженной модели горения, определены границы устойчивости горения при резком сбросе давления.

**Личный вклад автора заключается в** непосредственном участии в постановке всех задач, формулировании физико-математических моделей, выполнении расчетов, обработке и анализе всех результатов, проведенных в работе. Обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем. При активном участии автора подготовлены основные публикации по теме диссертации.

Диссертация соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи определения скорости горения металлизированного твердого топлива, учитывающая процессы тепломассопереноса над поверхностью топлива, имеющей значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники.

На заседании 11.12.2015 г. диссертационный совет принял решение присудить **Порязову В.А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 24 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 24, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*Igor Vasenin*  
*Elizaveta Pikuಷak*

Васенин Игорь Михайлович

Пикуಷак Елизавета Владимировна

11 декабря 2015 г.