

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: 24.2.327.08

Соискатель: Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич

**Тема диссертации: Моделирование рабочих процессов в камере сгорания
термокаталитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги**

Специальность: 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»

Решение диссертационного совета по результатам защиты: На заседании 26 декабря 2025 года, протокол, 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 Цырендоржиеву Эрдэни Сергеевичу 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., Маркеев А.П., Овчинников М.Ю., Ревизников Д.Л., Рябов П.Е., Черепанов В.В., Шамолин М.В.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.327.08,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

[Handwritten signature]

Гидаспов Владимир Юрьевич

Проректор по научной работе, д.т.н.,
доцент



Иванов Андрей Владимирович

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.08, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ
ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)», ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНДИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от _____ № _____

О присуждении Цырендоржиеву Эрдэни Сергеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование рабочих процессов в камере сгорания термokatалитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги» по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 23.10.2025 (протокол заседания №10) диссертационным советом 24.2.327.08, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство науки и высшего образования РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, приказ Минобрнауки России о создании совета №1192/нк от 12.10.2022.

Соискатель Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич, «29» декабря 1997 года рождения. В 2021 году соискатель окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» с присуждением квалификации «Инженер» (диплом серия 107718 номер 0003348 от 01.07.2021 г.).

В период с 2021 г. по 2025 г. проходил обучение в очной аспирантуре в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по специальности «Авиационная и ракетно-космическая техника» (диплом серия 107724 номер 1614931 от 16.07.2025 г.).

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2025 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

В настоящее время Цырендоржиев Э.С. работает в должности научного сотрудника отдела 40 в Акционерном обществе "Государственный научный центр Российской Федерации "Исследовательский центр имени М.В.Келдыша".

Диссертация выполнена в отделении 2 Акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации "Исследовательский центр имени М.В.Келдыша".

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, начальник отдела 40 Акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации "Исследовательский центр имени М.В.Келдыша", Лаптев Игорь Вячеславович.

Официальные оппоненты:

1. Козелков Андрей Сергеевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, доцент, начальник научно-исследовательского отдела – генеральный конструктор по направлению ЛОГОС-Аэрогидро Федерального государственного унитарного предприятия РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ", профессора кафедры «Прикладная Математика» НГТУ им Р.Е. Алексеева.
2. Харченко Николай Анатольевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории №1 Научно-исследовательского центра №43 федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»), доцент кафедры «Вычислительная математика и программирование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» (141401, Московская область, г. Химки, ул. Бурденко, д.1) в совсем положительном отзыве, подписанном главным специалистом, кандидатом технических наук Гапоновым Валерием Дмитриевичем; главным специалистом, доктором технических наук Мартиросовым Давидом Суреновичем, указала, что диссертация Цырендоржиева Э.С. «Моделирование рабочих процессов в камере сгорания термokatалитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги» является научно-квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых научных результатов, полученных при исследовании процесса фильтрационного горения в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Диссертация написана технически

грамотным языком, содержит логически стройный материал. Автореферат и публикации автора достаточно полно отражают основные выводы и результаты работы. Диссертация соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

Замечания по диссертации:

1. В разделах «Научная новизна» и «Положения, выносимые на защиту» упоминается методика численного моделирования. Однако в тексте диссертации такие методики отсутствуют. Представлены только постановка различных исследовательских задач, схем и методов численного эксперимента.
2. Оценка минимальной и максимальной оценки моделирования (валидация решателя) производится по экспериментальным данным Кестена А.С., но не указывается с какой погрешностью определены эти данные.

Доклад по теме диссертации заслушан и одобрен на заседании НТС АО «НПО Энергомаш» (протокол №07-2025 от 01.12.2025 г.)

Соискатель имеет по теме диссертации 10 опубликованных работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликован 4 работы.

1. Козаев А. Ш., Миронов В. В., Негодяев А. С., Цырендоржиев Э. С. Создание отечественной платформы средств математического моделирования и инженерного анализа для решения практических задач разработки и оптимизации изделий ракетно-космической техники // Космические аппараты и технологии, 2024, №2.
2. Лаптев И. В., Цырендоржиев Э. С. Моделирование процессов тепломассопереноса термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги // Труды МАИ, 2024, №138.
3. Цырендоржиев Э. С. Численное моделирование фильтрационного горения в камере сгорания термokatалитического ЖРДМТ на монотопливе// Математическое моделирование и численные методы, 2025, №2, С.130-144.
4. Цырендоржиев Э. С. Исследование влияния режимов работы и конструкции термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги на тепловое состояние во время работы // Тепловые процессы в технике, 2025, Т. 17, №5, С. 225-234.

В том числе имеется свидетельство о регистрации:

1. Ананьев А. В., Куроедов А.А., Лаптев И. В., Цырендоржиев Э.С. Программа для ЭВМ «Программа расчета параметров фильтрационного горения в камере сгорания ЖРДМТ» от 15.08.2023 №2023667463.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы (все отзывы положительные).

Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора физико-математических наук Козелкова Андрея Сергеевича, заверенный ученым секретарем ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ». Отзыв положительный, содержит следующие замечания и вопросы:

1. В актуальности темы обзор технических особенностей жидкостных ракетных двигателей сделан неплохо, а вот обзор и степень внедрения математического моделирования, как и обзор работ других исследователей в данной тематике практически отсутствует. В первой главе дан некий обзор, но его следовало бы перенести в часть «Актуальность...»
2. В диссертации написано, что *«разработана методика компьютерного моделирования термокаталитического ЖРДМТ как на базе платформы OpenFOAM [110], так и в пакете программ ЛОГОС [9]»*, однако, информация о внедрении методики в пакет программ ЛОГОС отсутствует (в четвертой главе приведены общие слова).
3. В целом не понятно разделение физико-математической модели на «межпоровый» и «поверхностный» газ. Система уравнений (1)-(4) при должной формулировке граничных условий на поверхности пор способна описать всю газодинамику в межпоровом пространстве, включая механизмы реакций в околопоровом пространстве. В диссертации явно не представлено описание взаимодействия/связи (замыкание систем при протекании реакций) между системами (1)-(4) и (5)-(6), что делает сложным адекватную оценку существенного усложнения базовой модели путем введения дополнительных уравнений для некоего «поверхностного» газа.
4. Для оценки численной методики необходимо все же проводить решение валидационной задачи на сходимость. Рисунок 2.7 показывает различие в ~15-17 % при сошедшемся решении. Различие существенное.
5. На рисунке 2.9 амплитуда колебаний также существенно различается в сравниваемых подходах. С чем это связано? Тоже рисунок 2.11, при этом различие 17% описывается как норма. Все же это большое различие. С чем оно связано?
6. При применении разработанной технологии для решения промышленно-ориентированных задач необходимо привести данные о размерностях моделей и

временах расчета (процессорного времени), для понимания возможности массового внедрения.

7. **Существенное** замечание к списку литературы – к источникам так относиться нельзя – где опубликованы некоторые работы просто не написано, например – 4, 18, 23, 32, 38, 39, 66, 68, 77, 79, 80, 81, 89, 94, 103, 106, 109.
8. Есть опечатки – *«Такие модели позволит проводить...; Пористая засыпки изотропная ...; ...»*, есть жаргонизмы – *«стационарностью «поля» пористости»*.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, кандидата физико-математических наук Харченко Николая Анатольевича, заверенный начальником управления персоналом ФАУ «ЦАГИ». Отзыв положительный, содержит замечания:

1. Несмотря на широкое использование численного моделирования, экспериментальная часть работы сведена к валидации по литературным данным. Отсутствие собственных экспериментальных исследований снижает степень достоверности полученных результатов диссертационной работы.
2. В обзоре подробно описано влияние излучения, но в представленной модели данной работы переизлучение в пористой среде и лучистый теплообмен между частицами фактически не реализованы.
3. Представленная физико-математическая модель при переходе к другим топливным составам и альтернативным «зелёным топливам» требует дополнительной калибровки параметров и констант реакций, получение которых требует существенной экспериментальной работы.
4. Работа содержит несогласованности в нумерации рисунков и таблиц, а также местами громоздкие формулировки, затрудняющие восприятие материала. Некоторые библиографические ссылки неполные, в частности на зарубежные литературные источники.

На автореферат диссертации поступило 6 отзывов. Все поступившие отзывы положительны. В поступивших отзывах отмечается актуальность и научная новизна диссертационного исследования, практическая значимость полученных результатов работы.

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». Отзыв подписан: доктор технических наук, заместитель генерального директора – директор исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология» Арефьев Константин Юрьевич. Отзыв положительный, в отзыве представлены замечания:

1. не приведен перечень типов катализаторов и унитарных топлив, для которых могут быть справедливы результаты диссертационного исследования;
2. математическая модель в автореферате представлена недостаточно подробно (отсутствуют значения некоторых коэффициентов, не представлены схемы численных методов, не указаны расшифровки некоторых величин);
3. недостаточно внимания уделено влиянию деградации катализатора по мере увеличению наработки ЖРДМТ на интенсивность разложения топлива;
4. в автореферате отсутствует подробное сопоставление расчетных и экспериментальных распределений температур в каталитическом блоке.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации». Отзыв подписан: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Степанова Валентина Анатольевна, и заверен: начальник УП. Отзыв положительный, в отзыве представлено замечание:

1. В автореферате четко не указана практическая значимость работы. Следует ли текст на стр. 5 раздела «Практическая ценность результатов работы» рассматривать как практическую значимость работы.

Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». Отзыв подписан: кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор отдела «Двигательные установки», и заверен: заместитель генерального директора по персоналу и общим вопросам. Отзыв положительный, в отзыве представлены замечания:

1. Из текста автореферата не всегда явно, о чем идет речь: или о фронте разложения топлива, или о фронте максимальной температуры межпорового газа, или о фронте максимальной температуры каталитического пакета.
2. Объяснение существования выявленного при выполнении работы значения «критического массового расхода топлива, при превышении которого дополнительное тепло не успевает поглощаться пористой структурой заданной геометрии», только усилением конвективного теплообмена с истекающими продуктами разложения представляется неубедительным, т.к не учитывает, например, таких факторов, как скорость происходящих химических реакций, пористость засыпки катализатора и отношения массы катализатора к массе поступающего в реактор топлива.
3. Текст автореферата не содержит блок-схемы программного обеспечения численного моделирования теплового состояния термokatалитического ЖРД, что не позволяет

объективно судить о том насколько качественно подготовлена компьютерная модель двигателя.

Акционерное общество «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение». Отзыв подписан: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Сильвестров Павел Валерьевич, и заверен: секретарь НТС. Отзыв положительный, в отзыве представлены замечания:

1. Было бы полезно дополнить обсуждение чувствительности модели к кинетическим параметрам гетерогенной реакции, поскольку в реальных каталитических средах данные параметры могут варьироваться.
2. В автореферате упомянуто оптимальное значение пористости, но механизм описан кратко – его можно было бы раскрыть подробнее.
3. Влияние радиационного теплообмена обозначено в рамках литературного обзора, но в итоговой модели он не представлен; желательно уточнить условия, при которых этим можно пренебречь.
4. В автореферате имеется незначительное количество пунктуационных ошибок и стилистических неточностей (с. 3, 4, 8, 9).

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Научно-технологический университет «Сириус». Отзыв подписан: кандидат технических наук, руководитель группы «Искусственный интеллект и математическое моделирование в промышленности», руководитель программы магистратуры «Искусственный интеллект и математическое моделирование в промышленности» Королева Анастасия Павловна, и заверен: руководитель группы по работе с НПР. Отзыв положительный, в отзыве представлены замечания:

1. Нечетко отражен вклад автора в программную реализацию описанной физико-математической модели, что можно было бы отразить в практической значимости работы.
2. Неясно проводилось ли исследование в части моделирования однородности пористости, в том числе при наличии зазоров между блоками каталитического пакета. Результаты численных экспериментов показаны только для однородной пористой засыпки.
3. Из автореферата неявно как определяется значение площади поверхности пористой засыпки в уравнении 2, при этом из публикаций можно сделать вывод, что используемое в модели допущение о сферичности неточно и модель позволяет

описывать течение в засыпке из частиц, форма которых может отклоняться от идеальной сферы.

4. В работе не отражено исследование на сходимость расчетной сетки, а также отсутствуют данные о типичных шагах по времени.
5. Полученные аппроксимирующие зависимости представлены только для определенного набора значений пористости. При этом автор не указывает, что данные значения пористости являются характерными для двигателей.
6. В автореферате имеется ряд опечаток и не состыковок. В частности, отнесенное к пористости число Рейнольдса записано неаккуратно, при определении числа Уомерсли не указано, что используется в качестве характерного размера.

Акционерное общество «Конструкторское бюро химического машиностроения имени А.М. Исаева». Отзыв подписан: главный специалист – начальник сектора Карманов Алексей Юрьевич, и заверен: ученый секретарь НТС. Отзыв положительный, в отзыве содержатся замечания:

1. В автореферате не сказано для какого топлива проводились расчеты, какие химические реакции моделировались, нет списка использованных величин и не для всех величин есть описание в тексте, недостаточно подробные описания рисунков. Все это затрудняет понимание изложенного в автореферате.
2. Рассматриваемая модель фильтрационного горения не учитывает переход топлива из жидкого состояния в газообразное и взаимодействие жидкой фазы с катализатором, при этом в разделе 3.1 рассматривается задача о нестационарном фильтрационном горении жидкого монотоплива.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в отрасли наук, к которой относится диссертационная работа Цырендоржиева Эрдэни Сергеевича, что подтверждается наличием у них многочисленных публикаций по теме диссертации в рецензируемых изданиях за последние 5 лет.

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

- *Получены фазовые портреты фронта* максимальной температуры в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги для различных условий работы двигателя.
- *Сформированы карты финальных положений фронта* в зависимости от числа Рейнольдса и начальной температуры каталитического пакета.

- *Получены аппроксимирующие зависимости, описывающие связь между параметрами работы двигателя, такими как массовый расход, циклограмма подачи топлива, начальная температура каталитического пакета, а также конструктивными характеристиками и финальным положением фронта.*
- *Предложена комплексная методика численного моделирования теплового состояния термокаталитического ЖРДМТ.*

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения результатов моделирования для создания тепловых и динамических моделей двигательных установок, оценки надежности катализатора, подбора параметров каталитических пакетов, а также прогнозирования поведения фронта разложения топлива в условиях варьирования режимов работы двигателя. Это в свою очередь позволит повысить уровень надежности и оптимизировать разрабатываемые изделия, снизить объем натурных испытаний и ускорить цикл разработки новых систем.

Достоверность и обоснованность применяемых математических моделей обусловлена использованием фундаментальных принципов математического моделирования механики сплошной среды.

Личный вклад заключается в том, что в соответствии с целями и задачами, сформулированными научным руководителем, соискателем проведена доработка математической модели и метода моделирования фильтрационного горения в пористой засыпке, обладающей неоднородностью пористости вдоль оси камеры сгорания двигателя. Метод реализован в форме программного модуля, учитывающего процессы тепломассопереноса в сопряженной постановке. Автором, совместно с научным руководителем, разработана методика компьютерного моделирования термокаталитического ЖРДМТ как на базе платформы OpenFOAM, так и в пакете программ ЛОГОС. Автором проведена серия численных экспериментов по исследованию фильтрационного горения в камере сгорания ракетного двигателя, выявлены закономерности рабочих параметров и сформулированы рекомендации по проектированию термокаталитических ЖРДМТ.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Цырендоржиев Э.С. ответил обстоятельно и аргументировано на задаваемые ему в ходе заседания вопросы.

Диссертационная работа Цырендоржиева Э.С. полностью удовлетворяет пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года «О порядке присуждения ученых степеней», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой

автором проведены исследования актуальных задач моделирования рабочих процессов в камере сгорания термokatалитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

На заседании 26 декабря 2025 года (протокол заседания № 13) диссертационный совет принял решение присудить Цырендоржиеву Эрдэни Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 5 докторов наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании в заседании; из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13 человек, против – 0 человек, недействительных бюллетеней – 0.

Проректор по научной работе, д.т.н.
доцент



Иванов Андрей Владимирович

Председатель диссертационного
совета 24.2.327.08,
доктор физико-математических наук,
профессор

Красильников Павел Сергеевич

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.327.08,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Гидаспов Владимир Юрьевич

26 декабря 2025 г.