

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.098.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ
МЕХАНИКИ ИМЕНИ А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ
КОРЮКОВА ИВАНА АЛЕКСАНДРОВИЧА
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело N _____
решение диссертационного совета
от 05 февраля 2025 года, протокол № 2
О присуждении Корюкову Ивану
Александровичу, гражданину РФ ученой
степени кандидата физико-
математических наук.

Диссертация «Численное моделирование ударно-волновых взаимодействий в высокоскоростных потоках газа» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 27 ноября 2025 года, протокол № 8 диссертационным советом 24.1.098.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1, приказ о создании диссертационного совета № 225/нк от 14.02.2023).

Соискатель Корюков Иван Александрович, 02 апреля 1994 года рождения, в 2017 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 03.04.01 Прикладные математика и физика., с 2017 по 2021 год проходил обучение в аспирантуре Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по специальности 01.06.01 Математика и механика. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2019 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением

высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)». В период подготовки диссертации Корюков И.А. работал в АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» в должности научного сотрудника.

Диссертация выполнена в лаборатории радиационной газовой динамики ФГБУН Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН.

Научный руководитель — д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Суржиков Сергей Тимофеевич, главный научный сотрудник лаборатории радиационной газовой динамики ФГБУН Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН.

Официальные оппоненты:

Кузенов Виктор Витальевич, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химической газовой динамики (Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»;

Поняев Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физической газодинамики (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук)

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация:

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». В своем положительном заключении, подписанным заместителем генерального директора — директором исследовательского центра "Аэрокосмические двигатели и химмотология", ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова», доктором технических наук Арёфьевым К.Ю. и научным руководителем по разработке аэрокосмических

двигателей, ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова», кандидатом технических наук Прохоровым А.Н., указала, что разработанные методики расчетов и авторские компьютерные коды позволят проводить сопряженные расчеты аэротермодинамики и теплового баланса ВЛА сложной геометрии, что позволит оптимизировать их конструкции и сократить сроки разработки.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 10 научных работ, изданных в периодических научных изданиях, сборниках материалов и тезисах докладов международных и всероссийских конференций, в том числе 5 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций и удовлетворяют критериям, изложенным в Рекомендациях ВАК РФ от 7 июля 2023 г.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Koryukov I.A., Kryukov I.A. Three-dimensional calculation of the aerothermodynamics of a double cone $25^\circ/55^\circ$ on an unstructured grid. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – No 1009 012003.
2. Корюков И.А., Сильвестров П.В. Численное моделирование аэродинамики простых геометрий с использованием приближенного вычисления потоков через грань расчетной ячейки методом AUSM \pm up2. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2022. – Т. 23, вып. 1.
3. Корюков И.А., Сильвестров П.В., Ишин Д.В. Пространственный расчет аэротермодинамики двойного конуса $25^\circ/55^\circ$ с помощью семейства компьютерных кодов UST3D. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2022. – Т. 23, вып. 1.
4. Корюков И.А., Рыбаков А.Н. Решение пространственной задачи теплового баланса высокоскоростного летательного аппарата. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2021. – Т. 22, вып. 2.

5. Корюков И.А., Рыбаков А.Н. Трехмерное моделирование теплового баланса на примере экспериментального летательного аппарата HIFiRE-1. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2022. – Т. 23, вып. 1.

В работе [1] автором было проведено расчетно-теоретическое исследование ударно-волнового взаимодействия в процессе обтекания двойного конуса высокоскоростным потоком газа. В работах [2, 3] автором представлено развитие вычислительной модели течения вязкого и невязкого совершенного газа на основе метода конечного объема расщепления по физическим процессам применительно к неструктурированным тетраэдральным расчетным сеткам путем использования приближенного метода расчета распада произвольного разрыва на границах ячеек AUSM \pm up2. На основе указанной модели разработан авторский компьютерный код аэротермодинамики ВЛА UST3D-AUSM \pm up2 и проведено расчетно-теоретическое исследование на примере обтекания основных конструктивных элементов. В работах [4, 5] автором проведено интегрирование пространственного параболического уравнения теплопроводности с использованием неструктурированных тетраэдральных сеток. Проведены численные эксперименты с использованием разработанного авторского компьютерного кода, а также выполнена интерпретация полученных результатов.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от:

- Д.т.н., заместителя генерального директора – директора исследовательского центра "Аэрокосмические двигатели и химмотология", ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова», доктора технических наук Арефьева К.Ю. и научного руководителя по разработке аэрокосмических двигателей, ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова», кандидата технических наук Прохорова А.Н., которые наряду с положительным отзывом сделали следующие замечания: 1. В работе мало внимания уделено проведению валидации и верификации математических моделей и авторских программных кодов, реализующих метод сопряженного численного моделирования внешней аэротермодинамики и задач прогрева на трехмерных неструктурированных

сетках для конструкций летательных аппаратов произвольных геометрий. При дальнейшем развитии работы целесообразным представляется провести более подробное и обширное сравнение с экспериментальными данными.

2. Предлагаемая автором методика сопряженного численного моделирования внешней аэродинамики и задач прогрева конструкции ВЛА основана на широко распространенном подходе разделения расчетов газовой динамики и теплопроводности с взаимным обменом граничных условий на поверхности раздела среды и твердого тела. Вместе с тем, в работе не в полной мере выделены особенности предлагаемой методики и ее отличия от существующих способов и программных решений, используемых в аэрокосмической промышленности.

3. При моделировании распределения температуры внутри твердого тела автором не указывается возможность использования переменных теплофизических свойств материала, зависящих от температуры. Отсутствие такой зависимости может повлиять на уровень тепловых потоков и точность решения системы уравнений.

4. В математической модели теплообмена между газом и твердым телом не прослеживается возможность учета поверхностных каталитических процессов, абляции материала, ламинарно-турбулентного перехода. Это существенно ограничивает применимость создаваемых авторских кодов для практических задач. Кроме того, в диссертации не конкретизируются значения температуры за фронтами образующихся ударно-волновых конфигураций, что затрудняет возможность определения степени применимости модели совершенного газа.

5. Автором не указаны критерии, по которым достигается сходимость результатов расчетов как в газодинамической, так и в тепловой задаче.

- д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории физико-химической газовой динамики Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» Кузенова В.В., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В рамках диссертации представлены расчетные данные, полученные с использованием

одного из приближенных методов решения задачи Римана AUSM^{up2}. При этом обсуждаются характерные особенности получаемых параметров в области отрывного течения за ВЛА. Однако в диссертации не отмечено, какие причины лежат в основе проблемы расчета отрывной зоны на неструктурированных сетках. 2. В диссертационной работе не отмечено при каких типичных значениях числа Рейнольдса проводились расчеты. 3. В диссертации не указывается порядок аппроксимации используемых математических моделей.

- К.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника лаборатории физической газодинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук Поняева С.А., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. В диссертации отмечено, что значения коэффициентов теплоемкости и теплопроводности при решении задачи прогрева принимались постоянными. Учитывалась ли их температурная зависимость для газодинамической задачи? 2. Насколько корректными являются результаты проведенных расчетов в приближении совершенного газа? 3. Для модели двойного конуса 25°/55° имело смысл провести более углубленное сравнение полученных расчетных результатов на неструктурированной расчетной сетке по сравнению с известными результатами на структурированной сетке, например, добавить исследования влияния размера пристеночных узлов неструктурированной сетки.

- Д.ф.-м.н., главного научного сотрудника ИПМ им. М.Келдыша Луцкого А.Е., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. На рис. 2, 3 представлено распределение числа Маха и температуры при обтекании затупленного конуса. Для распределения числа Маха вполне отчетливо наблюдается осевая симметрия. Однако, для распределения температуры в донной области видны нарушения осевой симметрии. Интересно, что все рассмотренные коды дают примерно одинаковую картину. Возможно, это свидетельствует о каких-то физических особенностях течения. Этот факт было бы желательно исследовать. 2. Как

можно судить по автореферату, все расчеты, включая $M=10$, выполнены в рамках модели совершенного газа ($y=\text{const}$). Между тем, во многих работах академика С.Т. Суржикова убедительно показано, что учет физико-химических реакций в воздухе при таких скоростях существенно влияет на распределение газодинамических величин и положение ударных волн. Хотелось бы пожелать автору учесть этот факт при дальнейших исследованиях.

- К.ф.-м.н., доцента, начальника лаборатории физических проблем АО «ГНЦ РФ ФЭИ» Будника А.П. Отзыв положительный, без замечаний. Указано, что впервые выполнено развитие трёхмерной вычислительной модели течения вязкого и невязкого совершенного газа на основе метода конечного объёма с использованием расщепления по физическим процессам применительно к неструктурированным расчётным сеткам посредством использования приближённого метода расчёта распада произвольного разрыва на границах ячеек сетки.

- Д.ф.-м.н., профессора, зав.лабораторией фундаментальных исследований Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации Исаева С.А., который наряду с положительным отзывом сделал следующие замечания: 1. Каковы неопределенности представленных расчетных результатов? 2. Почему не рассматриваются физико-химические превращения (расчеты выполнены для чисел Маха порядка 10)? 3. Декларируется, что разработан трехмерный код. Почему расчеты выполнены только для нулевого угла атаки?

- К.т.н., начальника отдела - заместителя начальника отделения, старшего научного сотрудника НТС АО «Корпорация «МИТ» Головина Н.Н. и начальника сектора НТС АО «Корпорация «МИТ» Шустова А.А., которые наряду с положительным отзывом сделали следующие замечания: 1. На странице 4 заявлена возможность сопряжённого численного моделирования внешней аэротермодинамики и задач прогрева конструкции высокоскоростного летательного аппарата при помощи разработанных соискателем компьютерных программ, однако в автореферате не приведена

формулировка условий сопряжения. 2. Записанная на странице 13 формулировка уравнения теплопроводности подразумевает коэффициент теплопроводности постоянным, соответственно, ограничивает использование разработанных компьютерным программ только расчётом конструкций, выполненных из изотропных материалов. Однако известно, что большинство конструкций высокоскоростных летательных аппаратов состоят из композитных материалов, имеющих анизотропные теплофизические характеристики. 3. На рисунках 8 и 9 у графиков распределения давления и плотности наблюдается резкий рост значений этих параметров в районе стыка цилиндрической части и хвостовой части исследуемого летательного аппарата при расчёте методом AUSMPW, но это явление отсутствует при расчёте методом AUSM², что, вероятно, является существенным различием двух полученных результатов, хотя на странице 18 говорится о незначительном расхождении.

- Д.т.н., директора научно-исследовательского испытательного комплекса АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова» Ермолаева А.Ю. и начальника научно-исследовательского расчётного отдела научно-исследовательского испытательного комплекса АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова» Бакова А.В., которые наряду с положительным отзывом сделали замечание: В автореферате не приведены некоторые практически важные параметры численного моделирования (время расчета варианта, характеристики расчетных сеток).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у официальных оппонентов и представителя ведущей организации публикаций по теме работы соискателя:

1. Котов М.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю., Глебов В.Н., Дуброва Г.А., Малютин А.М., Попов П.А., Поняев С.А., Монахов Н.А., Лапушкина Т.А., Сахаров В.А., Козлов П.В., Левашов В.Ю., Герасимов Г.Я. О принципах возникновения термоэдс при регистрации термоэлектрическим детектором тепловых потоков в импульсном газодинамическом

эксперименте. Физико-химическая кинетика в газовой динамике, т.25, 3, 2024, с. 49 – 68. <https://doi.org/10.33257/PhChGD.25.3.1114>

2. Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А., Поняев С.А., Куракин Р.О. Влияние материала диафрагмы на входе в сверхзвуковое сопло ударной трубы на обтекание затупленного тела. ЖТФ, т. 94, 4, 2024, с. 581- 589 <https://doi.org/10.33257/PhChGD.25.3.1114>

3. Барышников Ю.С., Куракин Р.О., Чикиряка А.В., Орлов Ф.А., Твердохлебов К.В., Леухин С.А., Юрченков М.И., Поняев С.А. Получение сферических частиц металлов на установке с жидким анодом. Прикладная физика, т.3, 2023, с. 18 – 24. <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2023-3-18-24>

4. Baryshnikov Yu.S., Kshakin R.O., Tverdokhlebov K.V., Chikiryaka A.V., Orlov F.A., Poniaev S.A. Liquid Anode Method as a Method for the Formation of Spherical Metal Particles. High Temp. Mater. Process, v.27, 3, 2023, p. 89 - 94 <http://dx.doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2022046579>

5. Попов П.А., Монахов Н.А., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Куракин Р.О. Калибровка тепловых датчиков на анизотропных термоэлементах и гетерогенных металлических структурах с помощью отраженной ударной волны. Письма ЖТФ, т.48, 20, 2022, с. 7 – 10.

<https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.20.53688.19297>

6. Попов П.А., Монахов Н.А., Лапушкина Т.А., Поняев С.А. Измерение нестационарного теплового потока в экспериментах на ударных трубах с помощью датчиков на основе анизотропных термоэлементов из висмута. ЖТФ, т.92, 9, 2022, с. 1334 – 1342.

<https://doi.org/10.21883/JTF.2022.09.52924.54-22>

7. Kotov M.A., Shemyakin A.N., Solovyov N.G., Yakimov M.Y., Glebov V.N., Dubrova G.A., Malyutin A.M., Popov P.A., Poniaev S.A., Lapushkina T.A., Monakhov N.A., Sakharov V.A. Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity. Appl. Therm. Eng., v.195, 2021, ArtNo: #117143.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117143>

8. Попов П.А., Сахаров В.А., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Монахов Н.А. Измерение тепловых потоков датчиками на анизотропных термоэлементах в газодинамическом эксперименте на ударных трубах. Физико-химическая кинетика в газовой динамике, т.22, 3, 2021, с. 31 - 41
<http://dx.doi.org/10.33257/PhChGD.22.3.939>
9. Безверхний Н.О., Лапушкина Т.А., Монахов Н.А., Петренко М.В., Поняев С.А. Исследование спектра излучения молекулы СаО в диапазоне длин волн 540-650 nm в экспериментах на ударной трубе. Письма ЖТФ, т.47, 2, 2021, с. 21 -23. <http://dx.doi.org/10.21883/PLIF.2021.02.50540.18473>
10. Plasma Actuators for Controlling Aerodynamic Flows (Review) Kuzenov V. V., Ryzhkov S.V., Khomicha V.Yu., Yamschikov V.A., Shakhmatov E.V. Technical Physics Letters. 025. V. 51. P. 262-269. DOI: 10.1134/S1063785025700282
11. Development of a method for solving elliptic differential equations based on a nonlinea compact-polynomial scheme. Kuzenov V.V., Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Journal of Comutational and Applied Mathematics <https://doi.org/10.1016/j.cam.2024.116098/> matical Problems Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Edited by Lihua Wang, Benny Yiu-Chung Hon and Sheng-Wei Chi [mdpi.com/journal/mathematics](https://www.mdpi.com/journal/mathematics), M. 2024. 265 c
12. Разработка методики оценки термонапряжений в элементах конструкции летательных аппаратов Кузенов В.В., Селезнев Р.К. Электронное научное издание Физико-химическая кинетика в газовой динамике 2023 Т.24(2). <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-2/articles/1039/>
13. Приближенный термический анализ нагрева и деформации пластины С/С-SiC в двигателе ГПВРД Кузенов В.В., Селезнев Р.К Электронное научное издание Физико-химическая кинетика в газовой динамике 2023 Т.24(2). <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-2/articles/1037/>
14. Computational and Experimental Modeling in Magnetoplasma Aerodynamics and High- Speed Gas and Plasma Flows (A Review) Kuzenov V.V., Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Aerospace,2023,Vol 10, Issue 8-Art.no662

15. Development of a Numerical Model Designed to Calculate the Temperature Field and Thermal Stresses in Structural Elements of Aircrafts. Kuzenov V V, Dobrynina A O, Shumaev V. V. Fluid Dynamics, 2022, Vol. 57, No. 9, pp. 170-180.
16. Calculation of Heat Transfer and Drag Coefficients for Aircraft Geometric Models. Kuzenov V.V., Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Appl. Sci. 2022, 12, 11011. <https://doi.org/10.3390/app122111011>
17. The Adaptive Composite Block-Structured Grid Calculation of the Gas-Dynamic Characteristics of an Aircraft Moving in a Gas Environment Kuzenov V.V., Varaksin A.Yu., Ryzhkov S.V. Mathematics 2022 .-Vol. 10, Issue 12.-Art.no 2130 DOI:10.3390/math10122130
18. Numerical Modeling of Individual Plasma Dynamic Characteristics of a Light-Erosion MPC Discharge in Gases Kuzenov V. V, Varaksin A. Yu., Ryzhkov S. V. Applied Sciences 2022 .- Vol. 12 , Issue 7 .- Art.no 3610 <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3610> DOI: 10.3390/app12073610
19. The qualitative and quantitative study of radiation sources with a model configuration of the electrode system Kuzenov V. V, Ryzhkov S. V. Symmetry 2021 .- Vol. 13 , Issue 6 .- Art.no 927 <https://apps.weobfknowled...LdSeFFn&page=T&doc=1> DOI: 10.3390/sym 13060927
20. Numerical Simulation of Pulsed Jets of high-current pulsed surface discharge Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Computational Thermal Sciences, 13(2):45—56 (2021)
21. Численное моделирование автоколебаний газа в камерах сгорания газотурбинных установок / Дробыш М.В., Дубовицкий А.Н., Лебедев А.Б., Фурлетов В.И., Якубовский К.Я. // Физика горения и взрыва. 2024. Т.60. С. 28-38.
22. Анализ влияния исходных требований к сверхзвуковому гражданскому самолету нового поколения на перечень критических технологий для его силовой установки / Алendarь А.Д., Грунин А.Н., Луковников А.В.,

Евстигнеев А.А., Ланшин А.И., Полев А.С. // Авиационные двигатели. 2024. № 4 (25). С. 7-20.

23. Комплексные многокомпонентные суррогаты авиационных коммерческих топлив типа керосин. Моделирование характеристик горения / Савельев А.М., Савельева В.А., Тарасенко А.Н., Торохов С.А., Кадочников И.Н., Новаковский Д.В. // Физика горения и взрыва. 2024.

24. Особенности математического моделирования процесса запуска авиационного ГТД / Эзрохи Ю.А. // Труды МАИ. 2024. №139

25. Особенности расчета летно-технических характеристик электрической силовой установки беспилотного летательного аппарата самолетного типа с помощью математического моделирования / Зиненков Ю.В., Луковников А.В. // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 85-94.

26. Математическое моделирование работы газотурбинного двигателя на режиме авторотации / Гуревич О.С., Зуев С.А. // Авиационные двигатели. 2024. №3(24). С. 73-85.

27. Расчетное исследование тонального шума модельного вентилятора со сверхнизкой окружной скоростью на режимах «набор высоты» и «взлет» с использованием метода расчета в частотной области / Россихин А.А., Дружинин Я.М., Милешин В.И. // Математическое моделирование. 2025. Т. 37. № 5. С. 139-160.

28. Построение пространственной головной части минимального волнового сопротивления при заданных длине и круговом основании (Обзор) / Крайко А.Н., Тилляева Н.И., Браилко И.А. // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2025. № 1. С. 3-21

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Сформулированы краевые задачи обтекания и прогрева высокоскоростных летательных аппаратов. **Развит** метод расщепления по физическим процессам на трехмерных неструктурированных сетках путем использования

приближенного метода расчета распада произвольного разрыва на границах ячеек AUSM \pm up2 применительно к расчету аэротермодинамики высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) различной формы. **Выполнено** систематическое численное исследование аэротермодинамики на примере конструктивно-подобных геометрий и экспериментального высокоскоростного летательного аппарата HIFiRE-1 с использованием разработанного компьютерного кода, реализующего численное интегрирование систем уравнений Эйлера и Навье-Стокса на трехмерных неструктурированных сетках. **Исследована** чувствительность получаемых решений от использования расчетных сеток разной подробности. **Проведено** расчетно-теоретическое исследование пространственной задачи прогрева на примере экспериментального высокоскоростного аппарата HIFiRE-1 с использованием разработанного авторского компьютерного кода, реализующего решение уравнения теплопроводности. **Показана** возможность расчета прогрева конструкции с учетом композиций материалов. **Исследована** сходимость решения с использованием приближенных методов расчета распада произвольного разрыва на границах ячеек (метод донорных ячеек, AUSM PW и AUSM \pm up2). **Показано**, что использование метода AUSM \pm up2 позволяет стабилизировать решение в зоне ударной волны.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложен численный метод интегрирования уравнений Эйлера и Навье-Стокса на неструктурированных сетках с реализацией приближенного метода расчета распада произвольного разрыва на границах ячеек AUSM \pm up2; **проведено исследование** аэротермодинамики высокоскоростных летательных аппаратов при различных режимах полета с использованием разработанного метода на примере конструктивно-подобных геометрий (двойной конус, цилиндр, конус, затупленный по сфере) и экспериментального высокоскоростного летательного аппарата HIFiRE-1; **получено** распределение аэротермодинамических характеристик вдоль поверхности и проведено сравнение с данными, полученными с

использованием авторских компьютерных кодов, разработанных другими исследователями; **представлен** численный метод интегрирования уравнения теплопроводности на неструктурированных сетках в трехмерной постановке задачи; **исследованы** особенности прогрева высокоскоростных летательных аппаратов на примере конструктивно-подобных геометрий и экспериментального высокоскоростного летательного аппарата HIFiRE-1 с использованием разработанного метода; **получены** результаты по температурному распределению внутри твердого тела на примере экспериментального высокоскоростного летательного аппарата HIFiRE-1 с учетом композиций материалов.

Значение получаемых соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Разработана авторская компьютерная программа расчета аэротермодинамики ВЛА, с использованием которой выполнено численное исследование пространственной задачи обтекания конструктивно-подобных моделей и экспериментального высокоскоростного аппарата HIFiRE-1.

Разработан компьютерный код, с использованием которого проведено расчетно-теоретическое исследование пространственной задачи прогрева оболочки экспериментального ВЛА HIFiRE-1. Данный авторский компьютерный код реализует решение уравнения теплопроводности с учетом композиций материалов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

аналитические и численные расчеты проведены с использованием современных теоретических моделей и математического аппарата физической механики. Результаты, полученные диссертантом, достаточно хорошо согласуются с расчетными и экспериментальными данными, полученным другими исследователями.

Личный вклад соискателя. Все выносимые на защиту результаты получены диссертантом лично. В постановке задачи, обсуждении результатов и подготовке научных публикаций принимал участие научный руководитель С.Т. Суржиков. Соискателем выполнено развитие вычислительной модели

течения совершенного газа на основе метода конечного объема применительно к неструктурированным тетраэдральным расчетным сеткам путем использования приближенного метода расчета распада произвольного разрыва. На основе указанной модели разработан авторский компьютерный код аэротермодинамики ВЛА и проведено расчетно-теоретическое исследование на примере обтекания типичных элементов конструкции ВЛА. Автором разработана компьютерная программа и выполнено численное исследование прогрева типичных конструкций ВЛА с использованием неструктурированных тетраэдральных сеток. Проведены численные эксперименты с использованием разработанных авторских компьютерных кодов, а также выполнена интерпретация полученных результатов.

В ходе защиты были высказаны следующие критические замечания и заданы следующие вопросы: вопрос о максимальной погрешности при сопоставлении полученных результатов с результатами других авторов; вопрос об учете образовании плазмы и учете химических реакций вдоль поверхности геометрий; вопрос о применении изменяемой расчетной сетки при проведении расчетно-теоретических исследований прогрева конструкций.

Соискатель Корюков И.А. ответил по существу на задаваемые ему в ходе заседания вопросы. Дал пояснения, что при сопоставлении результатов расчета аэродинамических характеристик погрешность составляла 1...3%; подчеркнул, что в подобных задачах внешнего обтекания конструкций, при высоких скоростях образуется плазма и происходят химические реакции, но в рассматриваемых задачах в своей работе не учитывал образования плазмы и химические приращения, так как для расчета аэродинамических характеристик этого не требуется; дал пояснения, что в работе рассматривается неподвижная сетка, но в дальнейших исследованиях планирует включить такую возможность в разработанный им компьютерный код.

На заседании 05.02.2026 года **Диссертационный совет принял решение:** за получение новых научных результатов, обеспечивающих развитие математического аппарата в области численного моделирования

задач механики высокоскоростных потоков газа и прогрева элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов, присудить Корюкову И.А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Зам. председателя диссертационного совета

24.1.098.01 при ИПМех РАН

член-корреспондент РАН



Якуш С.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.098.01 при ИПМех РАН,

к.ф.-м.н.

Сысоева Е.Я.

06 февраля 2025 г.