

УТВЕРЖДАЮ



Заместитель генерального  
директора по науке  
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Луковников А.В.  
«23» 12 2025 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального автономного учреждения  
«Центральный институт авиационного моторостроения имени  
П.И. Баранова» на диссертационную работу  
Корюкова Ивана Александровича  
«Численное моделирование ударно-волновых взаимодействий  
в высокоскоростных потоках газа»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Целью диссертационной работы** является численное моделирование ударно-волновых взаимодействий в высокоскоростных потоках газа на примере расчетно-теоретического исследования газодинамики и сопряженного теплообмена высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) и их ключевых элементов.

**Актуальность.** Разработка перспективных образцов авиационно-космической техники невозможна без досконального исследования широкой номенклатуры физических процессов, сопровождающих их в типичных условиях эксплуатации. Как в Российской Федерации, так и в наиболее развитых зарубежных государствах получили широкое развитие специализированные компьютерные коды, позволяющие достоверно определять аэродинамические характеристики ВЛА в условиях высокой

стоимости и значительной трудоемкости летных и стендовых испытаний. Настоящая работа направлена на совершенствование текущих и разработку новых вычислительных моделей аэродинамики ВЛА, что обуславливает ее актуальность.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Развита программная реализация метода 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 аэродинамики высокоскоростных летательных аппаратов различной формы.

2. Предложена методика сопряженного численного моделирования внешней аэродинамики и задач прогрева конструкции высокоскоростных летательных аппаратов.

3. Разработаны авторские программные коды, реализующие метод сопряженного численного моделирования внешней аэродинамики и задач прогрева на трехмерных неструктурированных сетках для конструкций летательных аппаратов произвольных геометрий.

4. Выполнено расчетно-теоретическое исследование пространственной задачи обтекания на примере экспериментального высокоскоростного аппарата HIFiRE-1 с использованием разработанного авторского компьютерного кода, реализующего модель вязкого сжимаемого теплопроводного газа на трехмерных неструктурированных сетках

5. Выполнено расчетно-теоретическое исследование пространственной задачи прогрева на примере экспериментального высокоскоростного аппарата HIFiRE-1 с использованием разработанного авторского компьютерного кода, реализующего решение уравнение теплопроводности, в том числе с учетом композиций материалов.

**Теоретическая и практическая значимость** Разработанные методики расчетов и авторские компьютерные коды позволяют проводить сопряженные

расчеты аэротермодинамики и теплового баланса ВЛА сложной геометрии, что позволит оптимизировать их конструкции и сократить сроки разработки.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Основные результаты диссертационной работы находят свое подтверждение при их сопоставлении с некоторыми расчетными и экспериментальными данными других авторов, что свидетельствует об обоснованности и достоверности научных положений.

**Личное участие соискателя в получении результатов, представленных в диссертации.** Автором диссертации было выполнено развитие вычислительной модели течения вязкого совершенного газа на основе метода конечных объемов в части использования приближенного метода расчета распада произвольного разрыва AUSM $\pm$ up2. На основе указанной модели разработан авторский компьютерный код UST3D-AUSM $\pm$ up2 и проведено расчетно-теоретическое исследование обтекания типовых конструктивных элементов ВЛА, в частности: цилиндра, затупленного конуса. Выполнено моделирование ударно-волнового взаимодействия в процессе обтекания двойного конуса высокоскоростным потоком газа. Автором также были разработаны методика и компьютерный код, позволяющий определять температурные распределения в элементах конструкции ВЛА с использованием уравнения теплопроводности, которое интегрируется методом конечных объемов на неструктурированных тетраэдральных сетках. Диссертант самостоятельно провел расчетные исследования и осуществил интерпретацию их результатов.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.** Результаты диссертации могут быть использованы профильными специалистами в научных организациях с целью получения дополнительной информации об особенностях газодинамических и тепловых процессов при высоких скоростях обтекания моделей ВЛА.

**Соответствие паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.** Диссертация Корюкова И.А. соответствует паспорту специальности 1.1.9. по направлениям исследований пп. № 4, 5, 10.

**Оценка основного содержания диссертации, формы и качества изложения материала.** Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, состоит из введения, 4 глав основного текста, заключения и списка литературы, включающего 217 источников. Оформление диссертационной работы отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат достаточно полно отражает структуру диссертационной работы и содержит необходимый текстовый и иллюстративный материал.

**Во введении** изложена структура диссертации, обоснована актуальность работы, приведен обзор литературы по историческим аспектам развития аэротермодинамических исследований, сформулирована цель и новизна работы, представлены выносимые на защиту положения.

**Первая глава** содержит анализ отечественного и зарубежного опыта теоретических и экспериментальных исследований аэротермодинамики ВЛА. Особый акцент сделан на обзоре проблемных вопросов компьютерного моделирования аэротермодинамики и тепловых нагрузок на ключевые элементы ВЛА.

**В второй главе** изложена система интегрируемых уравнений движения вязкого совершенного сжимаемого газа и теоретические аспекты компьютерного моделирования аэротермодинамики ВЛА.

**В третьей главе** сформулирована модель расчета распределения температуры в ключевых элементах ВЛА. Описаны начальные и граничные условия для численного решения уравнения теплопроводности с применением метода контрольного объема.

**Четвертая глава** включает результаты численного решения задач обтекания затупленного и двойного конуса, цилиндра, экспериментального ВЛА. На последнем объекте также демонстрируются результаты решения

задачи об определении теплового состояния элементов конструкции ВЛА HIFIRE-1, выполненного с применением разработанного диссидентом авторского компьютерного кода.

**В заключении** кратко изложены основные итоги диссертационной работы.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 статья в международном научном издании, включенном в системы цитирования Web of Sciences и Scopus.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы неоднократно демонстрировались и обсуждались на ведущих отечественных научных конференциях таких как: Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (2017–2020 гг.), Всероссийская научная конференция МФТИ (2017–2020 гг.).

По диссертационной работе имеются 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 аэrodинамики 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.

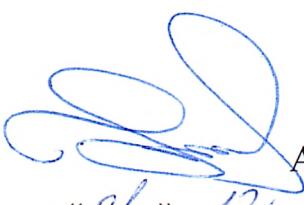
5. Автором не указаны критерии, по которым достигается сходимость результатов расчетов как в газодинамической, так и в тепловой задаче.

Указанные недостатки не снижают ценность и практическую значимость диссертации и не влияют на общую положительную оценку работы.

**Заключение.** Диссертационная работа Корюкова Ивана Александровича «Численное моделирование ударно-волновых взаимодействий в высокоскоростных потоках газа» является законченной законченным научным исследованием, которая несомненно может быть охарактеризована как научно-квалификационная работа, содержащая новые значимые научные результаты. Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на семинаре структурного подразделения ИЦ 1000 Государственного научного центра ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». Отзыв ведущей организации по диссертационной работе Корюкова Ивана Александровича рассмотрен и одобрен большинством голосов на заседании секции НТС ИЦ 1000, протокол от 24 декабря 2025 г. № 1000-32/23.

Заместитель генерального директора – директор исследовательского центра "Аэрокосмические двигатели и химмотология", ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова», доктор технических наук



Арефьев К. Ю.  
«26» 12 2025 г.

Научный руководитель по разработке аэрокосмических двигателей, ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова», кандидат технических наук



Прохоров А. Н.  
«26» 12 2025 г.

#### Контактная информация:

Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»).

Адрес: 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2.

Телефон: +7(499) 763-61-67.

Адрес электронной почты: [info@ciam.ru](mailto:info@ciam.ru).

Веб сайт: <https://www.ciam.ru>.