

## ОТЗЫВ

официального оппонента, д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника Кузенова Виктора Витальевича на диссертацию Корюкова Ивана Александровича «Численное моделирование ударно-волновых взаимодействий в высокоскоростных потоках газа», на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

**Целью диссертационной работы** Корюкова И.А. является разработка численных методик и компьютерных кодов, предназначенных для сопряженного моделирования аэродинамики высокоскоростных летательных аппаратов (ВЛА) и температурного поля внутри элементов их конструкций.

**Актуальность.** К настоящему моменту накоплен значительный опыт работ по проектированию и отработке ВЛА. Примером таких работ могут служить следующие национальные программы: Клипер в России, Нурег-Х в США, Pre-X во Франции, HYFLEX в Японии, Норрер в Германии, USV в Италии. В рамках этих программ получили существенное развитие высокоэффективные вычислительные технологии, основанные на применении специальных компьютерных кодов с целью расчетной интерпретации данных как стендовых, так и летных экспериментов. Данная диссертационная работа является актуальным примером развития отечественных национальных компьютерных кодов для решения широкого класса фундаментальных и прикладных задач.

**Научная новизна.** Разработаны авторские компьютерные коды, позволяющие выполнять расчет внешнего обтекания, определения аэродинамических характеристик и моделирования теплового состояния элементов конструкции ВЛА. Интерес представляют расчетные данные, полученные диссидентом для экспериментального ВЛА HIFIRE-1 с применением упомянутых ранее авторских компьютерных кодов.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанные в рамках работы над диссертацией компьютерные коды являются вычислительным инструментарием, позволяющим выполнять решение задач аэродинамики ВЛА, а также получать распределения температуры в их ключевых элементах, что необходимо для оценки уже теплопрочностных параметров ВЛА.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Изложенные в работе результаты выполнены с использованием известных, валидированных и верифицированных физико-математических моделей. Достоверность численных результатов работы и ее отдельных частей подтверждается сопоставлением с известными экспериментальными результатами и с расчетными данными других авторов.

**Личное участие соискателя в получении результатов, представленных в диссертации,** состояло в непосредственной разработке и модификации использованных в рамках диссертационной работы компьютерных кодов. Непосредст-

венно диссидентом также получены и проанализированы расчетные данные, касающиеся аэротермодинамики ВЛА и их ключевых элементов.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.** Использованные в диссертационной работе математические модели и разработанные авторские программные коды могут найти применение решении задач вычислительной аэродинамики и теплообмена, связанных с разработкой и совершенствованием ВЛА.

**Соответствие паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.** Диссертация Корюкова И.А. полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9., как по формуле специальности, так и по областям исследования.

**Оценка основного содержания диссертации, формы и качества изложения материала.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 146 страниц, включая 102 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 217 наименований. Оформление диссертационной работы отвечает всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемых в работе проблем, сформулирована цель и задачи работы, приведены результаты, представляющие новизну диссертационной работы, указана практическая ценность и положения, выносимые на защиту, кратко изложена структура диссертации.

**Первая глава** содержит анализ теоретических и практических исследований аэротермодинамики ВЛА, включая проблемы компьютерного моделирования аэродинамики и тепловых нагрузок в ключевых элементах ВЛА.

**Во второй главе** изложена численная модель, основанная на интегрировании системы пространственных уравнений Навье-Стокса с применением метода конечных объемов с учетом расщепления по физическим процессам на неструктурированных тетраэдральных сетках. Описана также методика приближенного расчета распада произвольного разрыва с использованием схемы AUSM $\pm$ up2, являющейся дальнейшим развитием широкого используемого семейства численных методов AUSM.

**В третьей главе** описаны основные уравнения, лежащие в основе математической модели прогрева ВЛА. Для решения данных уравнений также применяется метод конечных объемов.

**В четвертой главе** приведены результаты верификации и валидации разработанных численных моделей на примере расчета таких объектов как цилиндр, затупленный конус и двойной конус с изломом образующей. Заключительная часть главы посвящена расчету внешнего обтекания и прогрева ВЛА HIFire-1, в рамках которой изложена специфика иерархического применения разработанных диссидентом компьютерных кодов.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в работе, отражающие ее научную новизну и практическую значимость.

В целом можно отметить, что научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе И.А. Корюкова, характеризуются **обоснованностью и достоверностью**.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК категории К2, 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 рамках диссертации представлены расчетные данные, полученные с использованием одного из приближенных методов решения задачи Римана AUSM $\pm$ 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.

В целом указанные здесь недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы.

**Заключение.** В диссертации Корюкова И.А. получены новые научные результаты в области численного моделирования задач механики высокоскоростных потоков газа и созданы авторские компьютерные коды, предназначенные для решения этих задач. Результаты кандидатской диссертации имеют важное значение для решения прикладных задач. Диссертационная работа Корюкова Ивана Александровича «Численное моделирование ударно-волновых взаимодействий в высокоскоростных потоках газа» является законченным научным исследованием, содержащим достоверные научные результаты, обладающие новизной и практической значимостью, 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 её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

### **Оппонент**

Кузенов Виктор Витальевич, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-химической газовой динамики Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова».

**Адрес:** Россия, 101000, Москва, Моспочтамт, а/я 918

«24» 12 2025 г.



Виктор Витальевич Кузенов

Email: [vik.kuzenov@gmail.com](mailto:vik.kuzenov@gmail.com)  
т.: +7 (916) 632-50-46

Подпись В.В. Кузенова заверяю  
Ученый секретарь ФГУП «ВНИИА», к.т.н.

Л.В. Феоктистова

