

ОТЗЫВ

официального оппонента
доктора физико-математических наук, начальника отдела ФГУП ЦАГИ
Новикова Андрея Валерьевича
на диссертацию Яцухно Дмитрия Сергеевича
«Исследование азротермодинамики высокоскоростных летательных аппаратов с использованием моделей совершенного и реального газа»,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационная работа Яцухно Д.С. посвящена расчётно-теоретическим исследованиям различных типов высокоскоростных летательных аппаратов, в приближении совершенного или химически реагирующего газа.

Актуальность темы

В диссертации Яцухно Д.С. представлены результаты численного моделирования различных задач, которые составляют фундаментальные или прикладные направления высокоскоростной газовой динамики. В частности, это вопросы построения несущих поверхностей летательных аппаратов типа волнолёт с помощью численного решения обратной задачи аэродинамики. Интерес к волнолётам не ослабевает и обусловлен развитием новых конфигураций летательных аппаратов для сверх- и гиперзвуковых скоростей. Также, в диссертации рассмотрены вопросы генерации структурированных ортогональных расчётных сеток путем численного решения уравнений в частных производных различных типов. Разработка компьютерных кодов для построения сеток является актуальной задачей. Использование качественных сеток значительно расширяет возможности национальных компьютерных кодов в вопросах численного исследования задач теплообмена, исследовании пограничных слоев, турбулентности. Ещё один раздел диссертационной работы посвящен моделированию аэродинамики летательных аппаратов с использованием неструктурированных сеток, применение которых актуально при исследовании топологически сложных конфигураций, для которых затруднительно создать структурированную сетку. В заключительных главах диссертации рассмотрены

задачи расчёта тепловых потоков к поверхности марсианского спускаемого космического аппарата в двух- и трехмерной постановках. Полученные результаты представляют интерес при анализе актуальных результатов лётных экспериментов, проводимых в рамках международных программ по исследованию Марса.

Краткий анализ содержания работы

Настоящая диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 203 наименования, а также одного приложения.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, раскрывается её цель, практическая значимость и научная новизна;

В первой главе представлен обзор работ, посвященный расчётным и экспериментальным исследованиям волнолётов. В рамках главы также изложен метод построения несущей поверхности волнолёта с использованием линий тока течения за коническим скачком уплотнения.

Вторая глава посвящена разработке эллиптического и гиперболического сеточных генераторов, обеспечивающих построение структурированных ортогональных сеток для различных практических задач. Представлен обзор работ других авторов по этой тематике, сформулированы основополагающие уравнения, описан численный метод.

В третьей главе рассмотрены вопросы аэродинамики волнолётов для различных условий полета. В рамках этой главы проведено исследование характерных особенностей течения для различных моделей высокоскоростных летательных аппаратов. Практические аспекты применения волнолётов нашли отражение в соответствующих результатах численного моделирования.

Четвертая глава посвящена вопросам интерпретации лётных данных по радиационному нагреву задней поверхности спускаемого марсианского космического аппарата. Выполнено моделирование обтекания спускаемого аппарата под нулевым углом атаки в осесимметричной постановке. Получены

распределения конвективного и радиационного тепловых потоков для разных точек траектории.

В **пятой главе** содержатся результаты трёхмерного численного моделирования конвективного нагрева поверхности спускаемого космического аппарата, в том числе для различных каталитических условий поверхности.

В **заключении** кратко формулируются основные выводы диссертации.

Приложение содержит параметры применявшихся моделей химически реагирующих газов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается сравнением с расчетными данными других авторов, а также с данными стендовых и летных экспериментов.

Оценка научной новизны и практической значимости

Диссертационная работа содержит ряд новых результатов:

1. Основные положения известного метода газодинамического конструирования реализованы в авторском компьютерном коде, позволяющем выполнять построение поверхностей сверхзвуковых летательных аппаратов, используя линии тока конического поля течения.

2. Созданы генераторы структурированных расчётных сеток на основе уравнений эллиптического и гиперболического типа. Автором лично были разработаны компьютерные коды с использованием упомянутых математических моделей. Каждый сеточный генератор обладает особенностями, которые позволяют применять его для собственного класса задач вычислительной механики сплошной среды.

3. Выполнены расчёты аэродинамических характеристик волнолётов, а также летательных аппаратов на их основе. Полученные результаты сопоставлены с доступными экспериментальными и расчётными данными. Отражены особенности поля течения, характерные для различных типов волнолётов. К

прикладным задачам моделирования относятся оценка влияния притупления кромки на характеристики волнолёта, а также исследование волнолёта, сопряженного с ракетным ускорителем. Соответствующие расчетные данные позволяют оценить аэродинамику и газодинамические особенности обтекания реалистичных летательных аппаратов.

4. Проведено исследование тепловых потоков к поверхности спускаемого марсианского аппарата для актуальных траекторных точек. Полученные результаты включают распределение температур в ближнем поле течения и следе за аппаратом, при которых не происходит интенсивного протекания химических реакций. Показано, что радиационный тепловой поток вносит существенный вклад в общий нагрев поверхности.

5. Выполнено численное моделирование обтекания спускаемого аппарата под углом атаки и получено распределение конвективных тепловых потоков по поверхности. Для дополнительной траекторной точки, отвечающей условиям значительной интенсивности химических реакций, были получены сравнительные результаты по конвективному нагреву для каталитической и некаталитической поверхности. Свойства материала поверхности вносят существенный вклад в изменение распределения концентраций компонент CO и CO₂ вблизи аппарата и в следе за ним, а также влияют на распределение тепловых потоков.

Замечания по диссертационной работе

1. В рамках диссертации не уделено достаточного внимания вопросам разрешения области пограничного слоя при расчётах аэродинамических характеристик летательных аппаратов. Это не позволяет оценить корректность расчёта сопротивления поверхностного трения.

2. В диссертации не отражена информация о порядке аппроксимации исходных уравнений газовой динамики в рамках метода контрольного объема.

Указанные недостатки, тем не менее, не умаляют значение представленной диссертационной работы и не снижают положительную оценку.

Заключение

В рамках выполнения настоящей диссертационной работы автор продемонстрировал достаточную квалификацию, позволяющую проводить численное моделирование аэротермодинамики высокоскоростных летательных аппаратов. Разработанные в рамках диссертации компьютерные коды могут быть использованы для решения широкого круга прикладных задач газовой динамики. Значительную ценность представляют результаты, относящиеся к теплообмену спускаемого марсианского космического аппарата. Работа прошла достаточную апробацию: результаты докладывались на российских и высококотирующихся международных научных конференциях и опубликованы в 6 статьях в изданиях из списка ВАК.

Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание. Замечаний по оформлению реферата нет.

Считаю, что данная диссертационная работа «Исследование аэротермодинамики высокоскоростных летательных аппаратов с использованием моделей совершенного и реального газа» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Яцухно Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н., начальник отдела ФГУП ЦАГИ

А.В. Новиков

Подпись д.ф.-м.н. А.В. Новикова удостоверяется

Учёный секретарь Совета ЦАГИ

д.т.н., доцент



С.А. Таковицкий

25.11.2019