

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию Колесника Сергея Александровича «Разработка математического аппарата численно-аналитического решения прямых и обратных задач сопряженного теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»**

Диссертационная работа Колесника С.А. посвящена математическому моделированию переноса потенциалов в различных контактирующих средах, имеющих общую границу сопряжения, на которой ставятся условия непрерывности потенциалов и потоков и применению разработанного математического аппарата к исследованию сопряженного теплопереноса между вязкими теплогазодинамическими течениями и анизотропными телами в условиях аэрогазодинамического нагрева носовых частей скоростных летательных аппаратов (ЛА).

### **Актуальность**

При математическом моделировании проблем теплопереноса в условиях аэрогазодинамического нагрева ЛА сложился традиционный подход, в соответствии с которым задачи вязкой теплогазодинамики в приближении полных уравнений пограничного слоя или уравнений Навье-Стокса при определении тепловых потоков от газа к телу решались без учета теплового состояния обтекаемых тел с использованием температуры газа на границе «газ – твердое тело» в виде какого-либо приближения (например, температуры восстановления или адиабатической температуры). В свою очередь задачи определения температурных полей в обтекаемых телах с использованием тепловых потоков от газа к телу на границе сопряжения

ОБЩИЙ ДИПЛОМ МАИ  
Вход  
28 09 16



решались без учета газодинамических и теплофизических свойств газодинамического потока. Такое отдельное решение задач приводило к значительным погрешностям в определении тепловых потоков (погрешность в 50% считалась приемлемой) и температурных полей в элементах конструкций ЛА, увеличению массы тепловой защиты летательного аппарата в целом, что совершенно не приемлемо.

Решение задач теплопереноса в сопряженной постановке лишено указанных недостатков. Однако математическое моделирование сопряженного теплопереноса наталкивается на значительные трудности математического характера вследствие следующих причин: в контактирующих средах должны быть решены задачи, имеющие различную физическую природу, различные типы уравнений в частных производных и различное количество уравнений в разных средах. Вместе с тем, на границе сопряжения «газ – твердое тело» должны выполняться условия непрерывности температур и тепловых потоков (так называемых, граничных условий IV-го рода), которые невозможно задать *a priori*, поскольку их можно определить после решения задач теплогазодинамики и теплопроводности. При этом, поскольку большинство материалов тепловой защиты для скоростных и гиперзвуковых летательных аппаратов являются анизотропными, то тематика диссертационной работы, безусловно, является **актуальной**.

### **Содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения с обзором литературы, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, и двух приложений с описанием программных комплексов.

*В первой главе* сформулирована обобщенная математическая модель сопряженного теплопереноса между вязкими теплогазодинамическими течениями на основе уравнений Навье-Стокса и затупленными телами с анизотропией свойств теплопереноса. На границе «газ – твердое тело»



апостериорно (после решения задач в обеих средах) формируются граничные условия сопряжения в виде непрерывности температур и тепловых потоков.

*Во второй главе* для вязкого газодинамического течения и для анизотропного тела разработаны экономичные, абсолютно устойчивые методы численного решения на основе методов расщепления по координатным направлениям и экстраполяции по пространственным переменным и времени. На основе этих методов разработан высокоточный абсолютно устойчивый алгоритм численного сопряжения тепловых потоков и температур на границе «газ – твердое тело».

*В третьей главе*, на основе разработанных математических моделей, численных методов и комплекса программ, получены многочисленные результаты по взаимозависимости потенциалов в обеих средах, показано, что в отдельности задачи теплогазодинамики и анизотропной теплопроводности решать не возможно, поскольку установлено значительное влияние степени анизотропии анизотропного тела на тепловые потоки от газа к телу.

*В четвертой главе*, на основе разработанного метода построения граничных функций влияния получены аналитические решения класса задач анизотропной теплопроводности с граничными условиями второго, третьего и четвертого (условия сопряжения) родов, используемые не только для тестирования численных методов, но и для решения сопряженных задач теплогазодинамики и анизотропной теплопроводности.

*В пятой главе* разработана методология численного решения обратных задач теплообмена и анизотропной теплопроводности по восстановлению тепловых потоков от газодинамического течения и компонентов тензора теплопроводности анизотропного материала (в том числе и зависящих от температуры). Разработаны методы регуляризации функционалов квадратичной невязки между экспериментальными и теоретическими значениями температур. Получены многочисленные результаты численных экспериментов по восстановлению тепловых потоков и компонентов тензора теплопроводности, зависящих от температуры.



## Научная новизна

В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

– новые методы построения комплексных физико-математических моделей сопряженного теплообмена между вязкими теплогазодинамическими течениями и анизотропными телами на основе законов сохранения и тензорного характера переноса потенциала;

– разработаны новые экономичные абсолютно устойчивые методы численного решения задач вязкой теплогазодинамики на основе расщепления по координатным направлениям и экстраполяции по пространственным переменным и задач анизотропной теплопроводности с расщеплением и экстраполяцией по времени; доказаны теоремы об аппроксимации и об абсолютной устойчивости по начальным данным и правым частям;

– разработан новый метод высокоточного сопряжения потенциалов и потоков (температур и тепловых потоков) на границе «газ – твердое тело» с неявной аппроксимацией существенно нелинейных членов (например, лучистых тепловых потоков), входящих в граничное условие сопряжения; метод использует новые численные методы, разработанные для обеих сред;

– впервые, на основе построения граничных функций Грина получены аналитические решения класса задач анизотропной теплопроводности в анизотропных телах (наличие смешанных дифференциальных операторов в дифференциальных уравнениях); эти решения использованы не только для тестирования новых численных методов, но и численно-аналитического решения сопряженных задач теплообмена и анизотропной теплопроводности;

– на основе неявного метода градиентного спуска, метода параметрической идентификации, построения и решения задач по определению элементов матрицы чувствительности и новых методов регуляризации, впервые разработана методология численного решения сопряженных задач теплопереноса между вязкими газодинамическими



течениями и анизотропными телами по восстановлению тепловых потоков от газа и нелинейных компонентов тензоров теплопроводности анизотропных тел; полученные результаты численных экспериментов показали, что при использовании регуляризации функционала квадратичной невязки погрешности искомым функций находятся в окрестности погрешностей экспериментальных данных;

– разработаны два программных комплекса по решению сопряженных задач теплогазодинамики и анизотропной теплопроводности и обратных задач по восстановлению тепловых потоков и нелинейных компонентов тензора теплопроводности, позволяющие, в том числе проводить параллельные вычисления.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации,** обосновывается адекватными математическими моделями, доказательством теорем об аппроксимации и устойчивости численных методов, точными аналитическими решениями и тестированием с их помощью новых численных методов, доказательством теорем о сходимости глобальных итерационных процессов, а также адекватными результатами численных экспериментов.

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 64 публикациях, из них в одной монографии, 26-ти статьях в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (из них 15 в журналах, реферируемых в международных базах Web of Science или Scopus), 8-ми свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и учебном пособии.

**Автореферат** полностью отражает содержание диссертации.

Несмотря на то, что в диссертации решается сложная комплексная проблема сопряженного теплообмена, она легко читается, поскольку автор свободно владеет такими разделами современной математики, как уравнения



в частных производных, численные методы, теория функций комплексной переменной и операционное исчисление, идентификация и теория оптимизации.

### **Замечания**

1. При получении аналитических решений задач теплопереноса в анизотропных телах не обосновано применение интегральных преобразований Фурье и Лапласа.

2. При решении обратных задач сопряженного теплопереноса рассмотрены только линейно-непрерывные базисные функции, однако существуют и другие, например, более простые кусочно-постоянные базисные функции. Почему выбраны именно линейно-непрерывные?

3. Не обосновано количество узлов в анизотропном теле для получения в них экспериментальных значений температур и ничего не сказано о глубине заделки измерительных приборов в этих точках, хотя эти параметры существенно влияют на результаты идентификации.

4. Имеется незначительное орфографических и стилистических ошибок и опечаток.

### **Заключение**

Перечисленные замечания не оказывают существенного влияния на основные выводы диссертации, выполненной на высоком физико-математическом уровне.

Считаю, что диссертация Колесника Сергея Александровича «Разработка математического аппарата численно-аналитического решения прямых и обратных задач сопряженного теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, решает крупную научную проблему, имеющее большое теоретическое и практическое значение для решения различных задач по тепловому проектированию



летательных аппаратов, удовлетворяет всем требованиям утвержденным постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, заслуживает высокой оценки, а ее автор – присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой  
прикладной информатики и  
информационных технологий в управлении  
Поволжского института управления  
имени П. А. Столыпина –  
филиала ФГБОУ ВО «Российская  
академия народного хозяйства и  
государственной службы при Президенте  
Российской Федерации»,

д.ф.-м. н., доцент  
410031, г. Саратов,  
ул. Соборная, 23/25  
(8452) 65-36-92

kafprinform.piuis@yandex.ru

Дмитрий Вячеславович Кондратов

