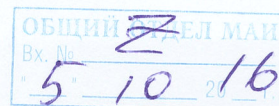


## ОТЗЫВ

**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»**

Тепловое проектирование изделий, находящихся в высокотемпературных и химически агрессивных газодинамических средах традиционно реализуется таким образом, что тепловые потоки к телу определяются по полуэмпирическим формулам без учета теплового состояния тела, а температурные поля в теле определяются по этим тепловым потокам, используемым в качестве граничных условий, без учета реальных тепловых и газодинамических характеристик окружающей среды. При этом погрешности в определении тепловых потоков и температурных полей в 50% и более считались обычными. Такой подход существенно увеличивал вес конструкции за счет увеличения массы тепловой защиты и в конечном счете – к существенному удорожанию изделия.

В настоящее время, в связи с увеличением мощности современных компьютеров и развитием эффективных численных методов, развивается другой подход к тепловому проектированию изделий, в частности высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА), связанный с математическим моделированием сопряженного теплообмена при одновременном решении задач теплогазодинамики и теплопереноса в обтекаемых элементах конструкций с использованием граничных условий четвертого рода (по Лыкову А.В.), то есть непрерывности тепловых потоков и температур на границах «газ – твердое тело». Такой подход учитывает тепловое состояние различных сред на границе сопряжения и исключает



возникновение значительных погрешностей. При этом, поскольку высокоскоростные ЛА имеют тепловую защиту, изготовленную из анизотропных материалов (графиты, углерод-углеродные композиты, композиты на основе кремнийорганических наполнителей и т.п.), то для таких изделий сопряженный теплообмен имеет существенные отличия от сопряженного теплообмена на изотропных телах.

В этой связи тематика диссертационной работы Колесника С.А., направленная на разработку математического аппарата численно-аналитического решения прямых и обратных задач теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами, является **актуальной**.

Математическое моделирование сопряженного теплообмена усложняется тем, что граничные условия на границе «газ – твердое тело» могут быть определены после решения задач теплогазодинамики между головной ударной волной и анизотропным телом и теплопроводности в анизотропном теле. Общий метод решения сопряженных задач теплопереноса, который использован в диссертации, сформулировал акад. Лыков А.В. В соответствии с этим методом вводится параметр сопряжения, в качестве которого принимается распределение температур границы «газ – твердое тело»; с этим параметром, как с граничным условием, решается задача теплогазодинамики в газодинамическом течении и теплопроводности в анизотропном теле, то есть оба решения зависят от неизвестного параметра температуры границы сопряжения. Продифференцировав по нормали к телу оба этих решения на границе сопряжения и используя непрерывность тепловых потоков, определяется температура границы «газ – твердое тело», которая подставляется в ранее полученные через этот параметр решения в обеих средах.

Поскольку задачи теплогазодинамики являются существенно нелинейными, а задачи анизотропной теплопроводности содержат смешанные дифференциальные операторы, необходимо было разработать эффективные численные методы, согласованные на границе сопряжения. В диссертации были разработаны и обусловлены по аппроксимации, устойчивости и сходимости экономичные абсолютно устойчивые численные методы решения задач теплогазодинамики, анизотропной теплопроводности и сопряженных задач газодинамики и теплопроводности. С целью тестирования разработанных численных методов получены аналитические решения класса задач анизотропной теплопроводности с граничными условиями второго, третьего и четвертого родов.

Другой подход математического моделирования сопряженного теплопереноса, развитый в диссертации, связан с разработкой математического аппарата численного решения обратных задач по восстановлению тепловых потоков от газодинамического течения и компонентов тензора теплопроводности (в том числе зависящих от температуры) обтекаемых анизотропных тел с использованием экспериментальных значений температур в пространственно-временных узлах анизотропного тела.

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

*В первой главе* разработана комплексная физико-математическая модель сопряженного теплообмена на основе уравнений теплогазодинамики в ударном слое с использованием уравнений Навье-Стокса, описанием различных моделей турбулентности. и теплопереноса в анизотропных телах в комбинированных системах координат.

*Во второй главе* на основе расщепления дифференциальных операторов разработаны и обоснованы по аппроксимации, устойчивости и сходимости новые численные методы с экстраполяцией численного решения уравнений теплогазодинамики, анизотропной теплопроводности, использованные для высокоточной аппроксимации краевого условия четвертого рода на границе сопряжения.

*В третьей главе* по разработанной методологии и интегрированному программному комплексу получены результаты в виде тепловых потоков к телу и температурных полей в газе и анизотропном теле, состыкованные на границе тела.

Исследовано влияние продольной степени анизотропии анизотропного затупленного тела на тепловые потоки от газа к телу и на температурные поля в теле. Показано существенное отличие сопряженного теплообмена для анизотропных тел от изотропных.

*В четвертой главе*, на основе построения граничных функций влияния, впервые получены аналитические решения задач теплопроводности, содержащие смешанные производные, причем функции влияния найдены с помощью интегральных преобразований Фурье и Лапласа, поскольку смешанные производные не разделяются. Эти решения использованы для тестирования новых численных методов, а также для определения температурных полей в анизотропных телах.

*В пятой главе* разработан новый метод математического моделирования обратных граничных и коэффициентных задач сопряженного теплопереноса по восстановлению тепловых потоков от газа к анизотропному телу и нелинейных компонентов тензора теплопроводности. Математическое моделирование обратных задач основано на неявном методе градиентного спуска минимизации квадратичного функционала невязки, методах численного решения прямых задач теплопереноса и задач

относительно элементов матрицы коэффициентов чувствительности. параметрической идентификации и регуляризации квадратичного функционала. Получены многочисленные результаты по восстановлению тепловых потоков и нелинейных компонентов тензора теплопроводности на основе экспериментальных значений температур в теле и априорных предположений о качественных характеристиках искомых функций.

В диссертации получены следующие **новые научные результаты**:

– разработаны новые методы численного решения задач теплогазодинамики, анизотропной теплопроводности и сопряженных задач газодинамики и анизотропной теплопроводности, обладающие экономичностью за счет расщепления дифференциальных операторов и использования методов скалярной прогонки, а также абсолютной устойчивостью;

– на основе этих численных методов разработан программный комплекс по определению теплогазодинамических характеристик в ударном слое, тепловых потоков от газа к анизотропному телу, нестационарных температурных полей в анизотропных затупленных телах;

– с помощью программного комплекса исследовано влияние степени продольной анизотропии тела на тепловые потоки от газа к анизотропному телу, получен новый результат о том, что при степени продольной анизотропии затупленного тела не ниже 10 резко уменьшаются тепловые потоки от газа к боковой поверхности тела и даже становятся отрицательными;

– на основе построения граничных функций влияния и применения методов интегральных преобразований впервые получены аналитические решения задач анизотропной теплопроводности с граничными условиями второго и третьего родов, а также приближенно-аналитические решения сопряженных задач вязкой газодинамики и анизотропной теплопроводности;

– разработана методология численного решения обратных задач сопряженного теплопереноса по восстановлению тепловых потоков от газа к анизотропному телу и нелинейных компонентов тензора теплопроводности, зависящих от температуры, на основе экспериментальных значений температур в теле;

– методология включает в себя неявный метод градиентного спуска минимизации квадратичного функционала, формирование и численное решение задач относительно коэффициентов чувствительности, параметрическую идентификацию и разработку и использование регуляризирующих функционалов;

– на основе этой методологии разработаны программные комплексы по восстановлению тепловых потоков к анизотропному телу и нелинейных компонентов тензора теплопроводности, с помощью которых получены многочисленные результаты, в частности, влияние на искомые параметры регуляризирующих функционалов, построенных на основе априорных предположениях о принадлежности искомым функций классам  $C_1$  и  $C_2$ .

**Достоверность** научных результатов, полученных в диссертации, обосновывается использованием адекватных математических моделей, точными аналитическими решениями, строгим доказательством теорем, тестированием численных методов, сравнением с численными решениями, полученными другими авторами.

**По результатам диссертационной работы опубликовано 64 публикации**, среди которых одна монография, 26 работы в журналах из перечня ведущих рецензируемых изданий ВАК РФ (в том числе 15 в журналах, реферируемых в международных базах Web of Science и Scopus), 8 авторских свидетельств, одно учебное пособие.

**Автореферат** полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа изложена на доходчивом математическом уровне, поскольку автор свободно владеет такими разделами математики, как численные методы, методы функционального анализа, методы математической физики, методы теории функций комплексной переменной и операционного исчисления, методы интегральных преобразований и идентификации.

### **Замечания:**

1. Не исследована сходимость функциональных рядов в аналитических решениях задач анизотропной теплопроводности, особенно в окрестности начального момента времени.

2. Возникает путаница в понятии «сопряженный». Этот термин используется в физическом смысле, когда рассматриваются совместные задачи газодинамики и теплопроводности и в математическом смысле при решении обратных задач.

3. Не сформулирован четко критерий истинности восстанавливаемых функций в обратных задачах. Ведь об искомым функциям ничего неизвестно, кроме экспериментальных значений температур в анизотропном теле и некоторых априорных предположений о виде функций.

Указанные замечания никак не влияют на общий высокий физико-математический уровень диссертационной работы Колесника С.А., поэтому полагаю, 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, в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное теоретическое и практическое

значение в области тепловой защиты высокоскоростных летательных аппаратов, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, установленных постановлением Правительством РФ №842 от 24.09.2013 "О порядке присуждения ученых степеней", 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:  
Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, профессор кафедры  
«Высшая и прикладная математика» при  
Институте тонких химических технологий  
ФГБОУ ВО «Московский технологический  
университет»

Карташов Эдуард Михайлович

03.10.2016

Подпись профессора Карташова Э.М. удостоверяю:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Московский технологический университет"

119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78.

Телефон: +7 499 215-65-65 доб. 1140

E-mail: mirea@mirea.ru