



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**федеральное государственное**  
**бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего**  
**образования**  
**«Самарский государственный**  
**технический университет»**  
**(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)**

ул. Молодогвардейская, 244  
г. Самара, 443100  
Тел. (846) 2784-311 Факс (846) 278-44-00  
E-mail: rector@samgtu.ru

19 09 16 № 84/3124.

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»  
Ректор ФГБОУ ВО

«Самарский государственный  
технический университет»  
доктор технических наук,  
профессор

Д. Е. Быков



### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу 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 Сергея Александровича посвящена разработке математического аппарата численного и аналитического решения прямых и обратных задач теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами в условиях аэрогазодинамического нагрева скоростных летательных аппаратов (ЛА), имеющих тепловую защиту, изготовленную из материалов, обладающих анизотропией свойств теплопереноса (различные композиционные материалы, графиты и графитосодержащие материалы и др.). Математический аппарат включает: математические модели теплогазодинамики, анизотропной теплопроводности, их сопряжение на границе «газ – твердое тело», разработку новых численных и аналитических методов, их обоснование, разработку методологии численного решения обратных задач сопряженного теплопереноса вязкой газодинамики и анизотропной теплопроводности, а также разработку соответствующих программных комплексов.

Актуальность темы связана с необходимостью совместного решения задач по определению тепловых потоков от газодинамических течений к элементам конструкций ЛА и температурных полей в этих элементах с определением степени

3 10 2016



взаимного влияния характеристик газодинамических течений на температурные поля в теле и наоборот – температурных полей в теле на характеристики теплогазодинамических течений, поскольку раздельное определение тепловых потоков без учета теплового состояния тела приводит не только к количественным погрешностям (до 50% и выше), но и качественно неадекватным результатам.

Тематика диссертационной работы соответствует специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Цель работы:** разработка математического аппарата на основе комплексных математических моделей, численных и аналитических методов решения прямых и обратных задач теплопереноса между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами и применение его в задачах аэрогазодинамического нагрева гиперзвуковых ЛА.

**Для достижения данной цели необходимо было разработать:**

- методы построения комплексных физико-математических моделей совместного теплопереноса между вязкими теплогазодинамическими течениями в ударных слоях и анизотропными телами, теплоперенос в которых носит тензорный характер;

- новые и модифицировать существующие экономичные, абсолютно устойчивые численные методы решения задач теплогазодинамики и теплопереноса в анизотропных телах, обосновать их по аппроксимации, устойчивости, сходимости;

- численный метод сопряжения на границе «газ – твердое тело» в условиях неопределенных потенциалов с обеих сторон границы сопряжения; методы аналитического решения класса задач для уравнений параболического типа, содержащих смешанные дифференциальные операторы, с граничными условиями различных типов;

- методы численного решения задач идентификации по восстановлению линейных и нелинейных характеристик сопряженного теплопереноса;

- класс программных комплексов по решению прямых и обратных задач сопряженного теплопереноса, получение и анализ результатов компьютерного моделирования.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

- предложены новые методы построения комплексных физико-математических моделей теплопереноса между вязкими теплогазодинамическими течениями и телами с анизотропией свойств переноса тепла;

- разработан новый экономичный, абсолютно устойчивый метод расщепления с экстраполяцией по пространственным переменным (МРЭП) с использованием апостериорной информации и процедуры «предиктор-коллектор» численного решения задач теплогазодинамики между ударной волной и анизотропным телом, доказаны теоремы об аппроксимации со вторым порядком и об абсолютной устойчивости;

- разработана и обоснована по аппроксимации и устойчивости модификация метода расщепления с экстраполяцией по времени (МРЭВ) численного решения задач для уравнений параболического типа, содержащих смешанные дифференциальные операторы, с использованием апостериорной информации в



левых сечениях на верхних временных слоях, доказаны теоремы об аппроксимации и абсолютной устойчивости, в том числе в условиях сопряжения;

– разработан новый численный метод высокоточного определения параметра сопряжения – температуры границы «газ – твердое тело», сохраняющий высокий порядок точности и абсолютную устойчивость за счет неявной аппроксимации существенно нелинейных тепловых потоков, действующих на границе сопряжения с обеих сторон;

– впервые, на основе построения граничных функций влияния (функций Грина) и интегральных методов, получены аналитические решения класса задач для уравнений параболического типа со смешанными производными с граничными условиями II-IV родов, используемые для приближенно-аналитического решения сопряженных задач теплогазодинамики и анизотропной теплопроводности;

– впервые разработана методология численного решения обратных коэффициентных и граничных задач сопряженного теплопереноса в анизотропных телах с регуляризацией функционала квадратичной невязки по восстановлению нелинейных компонентов тензора теплопроводности и тепловых потоков от газодинамического течения к границе «газ – анизотропное твердое тело»; методология основана на неявном методе градиентного спуска, методе параметрической идентификации, методе решения сопряженных (в математическом смысле) задач и методах построения регуляризирующих функционалов.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что ее основные положения могут быть использованы при проектировании тепловой защиты высокоскоростных летательных аппаратов. Полученные результаты компьютерного моделирования показали, что на основе формирования характеристик тензора теплопроводности теплозащитных материалов, можно существенно снизить тепловые потоки от газодинамического течения к телу.

**Достоверность результатов**, представленных в диссертационной работе, подтверждается адекватными математическими моделями, строгими математическими доказательствами, точными аналитическими решениями, согласованием численных результатов с результатами аналитических решений и численными результатами других авторов.

**Личный вклад.** Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию вошел лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

Работа прошла всестороннюю **апробацию**, поскольку ее результаты неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях и опубликованы в одной монографии, в 26 научных статьях в журналах из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (в том числе 15 в журналах, реферируемых в международных базах Web of Science или Scopus). Получено 8 свидетельств о государственной регистрации программных комплексов для ЭВМ. Помимо этого результаты диссертации опубликованы в других журналах, сборниках статей и трудах конференций, общее число научных публикаций – 64.

**Диссертация состоит** из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений с кратким описанием двух



программных комплексов.

**Во введении** проведен обзор литературы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** разработан метод математического моделирования сопряженного теплообмена между вязкими теплогазодинамическими течениями на основе уравнений Навье-Стокса в ударных газодинамических слоях и притупленными носовыми частями ЛА с анизотропной тепловой защитой. Уравнения теплопереноса в составном анизотропном теле рассмотрены в комбинированных криволинейных системах координат. Рассмотрены различные алгебраические и дифференциальные модели турбулентности. Сформулированы краевые условия сопряжения на границе «газ – твердое тело» и на ударной волне.

**Во второй главе** для математической модели сопряженного теплообмена в связанной системе координат разработаны и обоснованы по аппроксимации, устойчивости и сходимости новые экономичные, абсолютно устойчивые методы расщепления численного решения задач вязкой теплогазодинамики, нестационарных задач теплопроводности, содержащих смешанные производные и сопряженных задач теплогазодинамики и анизотропной теплопроводности. В этих методах, кроме идеологии расщепления по координатным направлениям, активно используется апостериорная информация о решении, полученная на верхних временных слоях в левых от расчетного сечения и на нижних временных слоях.

**В третьей главе**, на основе методов численного моделирования сопряженного теплопереноса между вязкими теплогазодинамическими течениями и анизотропным телами и разработанного программного комплекса, получены и проанализированы многочисленные результаты по взаимному влиянию на динамические и тепловые характеристики газодинамического течения компонентов тензора теплопроводности анизотропного тела. Установлено, что при большой степени продольной анизотропии (не менее 10) обтекаемого тела наблюдается значительный отток тепловой энергии в продольном направлении, что приводит к существенному повышению температур в хвостовой части и резкому уменьшению вследствие этого тепловых потоков от газа к телу и даже к их отрицательным значениям, то есть использование в качестве теплозащитных материалов с высокой продольной степенью анизотропии можно рекомендовать как новый эффективный способ тепловой защиты.

**В четвертой главе**, на основе методов построения граничных функций влияния (Грина) с помощью интегральных методов впервые получены точные аналитические решения класса задач теплопроводности в анизотропных телах с граничными условиями второго, третьего и четвертого родов, на основе которых получены приближенно-аналитические решения сопряженных задач теплопереноса между пристенными теплогазодинамическими течениями и анизотропными телами. Кроме этого, полученные решения использованы для тестирования новых численных методов.

**В пятой главе** впервые разработана замкнутая методология численного решения обратных граничных и коэффициентных задач (в том числе и нелинейных)



по восстановлению тепловых потоков и компонентов тензоров теплопроводности при сопряженном теплообмене между вязкими теплогазодинамическими течениями и анизотропными телами. Методология включает: неявный метод градиентного спуска, метод параметрической идентификации, численные методы прямых и сопряженных задач, методы регуляризации функционалов невязки, методы исследования сходимости итерационных алгоритмов минимизации квадратичных функционалов. На основе разработанных программных комплексов получены многочисленные результаты по восстановлению тепловых потоков от газодинамических течений и компонентов тензоров теплопроводности, зависящих от температуры, причем, регуляризация квадратичных функционалов невязки на основе априорных предположений о поведении искомых функций позволила получить погрешность результатов, сопоставимую с погрешностью экспериментальных данных.

**Значимость для науки** результатов диссертационной работы заключается в разработке в следующих математических моделях и методов решения: замкнутых математических моделей сопряженного теплообмена между вязкими газодинамическими течениями и анизотропными телами; новых экономичных, абсолютно устойчивых численных методов решения задач теплогазодинамики, анизотропной теплопроводности и сопряженных задач; новых аналитических решений класса задач для уравнений, содержащих смешанные производные; новой замкнутой методологии численного решения граничных и коэффициентных задач идентификации.

**Значимость для практики** результатов диссертации заключается в том, что они без изменения могут использоваться для теплового проектирования скоростных ЛА в условиях аэрогазодинамического нагрева.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Результаты диссертации могут быть использованы для определения тепловых потоков к затупленным телам с анизотропией свойств, для определения нестационарных температурных полей в анизотропных телах сложной формы в сопряженной постановке, при точном решении задач для уравнений теплопроводности, содержащих смешанные производные, при восстановлении нестационарных тепловых потоков от газодинамического течения к анизотропным телам, при восстановлении функциональных зависимостей от температуры компонентов тензоров теплопроводности.

#### **Замечания к диссертационной работе.**

1. В первой главе проведен обзор моделей турбулентности вязкого газодинамического течения, но не указано, какая модель используется в программных комплексах.

2. В главе 3 установлен факт разрыва на границе сопряжения двух анизотропных тел касательных составляющих вектора плотности теплового потока. Однако для границы сопряжения изотропного газа и анизотропного тела не показано как ведут себя нормальные и касательные составляющие вектора плотности теплового потока.

3. При разработке замкнутой методологии численного решения обратных задач используются экспериментальные данные, полученные расчетным путем, с



известными теплофизическими характеристиками, которые считаются искомыми. При этом, не указан критерий истинности в случае экспериментальных данных, полученных в натуральных экспериментах.

Указанные замечания не являются определяющими и не снижают значимости результатов и положительной оценки работы.

**Автореферат** диссертации соответствует представленной работе и достаточно полно отражает ее содержание. Имеющиеся публикации отражают основное содержание диссертации.

### **Заключение**

Диссертационная работа 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, выполненную на высоком научном уровне, по решению крупной проблемы о математическом моделировании сопряженного теплопереноса. Она удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, представляет научный и практический интерес, вследствие чего её автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа и отзыв были обсуждены и одобрены на заседании научно – технического совета кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» Самарского государственного технического университета - 29.08.2016 г. , протокол № 11.

Заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика» Самарского государственного технического университета, доктор физико-математических наук, профессор  
Кудинов Василий Александрович



Адрес организации: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.  
Адрес сайта организации в сети интернет: <http://www.samgtu.ru/>  
Тел. 8 (846) 278-43-11 Факс 8 (846) 278-44-00  
Электронная почта: [rector@samgtu.ru](mailto:rector@samgtu.ru)