

Отзыв

официального оппонента Костина Геннадия Федотовича на диссертацию Овчинникова Вячеслава Александровича на тему «Математическое моделирование аэродинамических процессов и тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Известно, что при проектировании тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА) необходимо учитывать влияние вдува продуктов разложения теплозащитных материалов в пограничный слой на теплообмен, коэффициенты трения, моменты крена, устойчивость ЛА при движении по траекториям спуска [1. Гофман, А. Я. О влиянии вдува продуктов разложения теплозащитных покрытий на момент крена осесимметричных летательных аппаратов / А. Я. Гофман, М. Г. Булыгин, В. И. Зинченко, Ю. М. Ковалев, Г. Ф. Костин, Ю. А. Мокин, В. В. Несмелов, Н. Н. Тихонов // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики.* – 2004. – С. 373–374; 2. Зинченко, В. И. Прогнозирование характеристик термодеструкции теплозащитных композиций в зависимости от их состава и свойств компонентов / В. И. Зинченко, В. В. Несмелов, В. Д. Гольдин // *Физика горения и взрыва.* Т. 41. № 1. – 2005. – С. 66–73. и др.]. Влияние вдува газообразных охладителей на параметры течения в пограничном слое и теплообмен необходимо учитывать и при разработке систем активной тепловой защиты [Полежаев, Ю. В. Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. – под ред. А. В. Лыкова. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.]. Несмотря на уже имеющиеся обширные результаты по данным направлениям, математическое моделирование соответствующих процессов, с учетом постоянного повышения требований к летным характеристикам ЛА и возрастающих вычислительных возможностей, требует все более комплексного рассмотрения и дальнейшего развития. В связи с этим тема диссертационной работы является актуальной.

Обзор публикаций диссертанта показывает, что исследования по теме диссертации проводились автором с последовательным расширением

учитываемых факторов и повышением сложности разрабатываемых математических моделей: пограничный слой на вращающихся телах, сопряженный теплообмен при обтекании вращающихся тел, влияние вдува на теплообмен и аэродинамические характеристики, влияние состава теплозащитного покрытия на вдув и теплообмен, аэродинамика и теплообмен при пространственном обтекании вращающихся тел и наличии вдува, вдув при транспирационном охлаждении, влияние малых возмущений на теплообмен при вдуве, учет влияния шероховатости на теплообмен. Уже в статье [Сопряженный тепломассообмен при сверхзвуковом обтекании вращающихся тел под углом атаки / В. Д. Гольдин, В. А. Овчинников // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9/3. – С. 49–51.] были представлены важные результаты по смещению максимумов прогрева и вдува продуктов разложения теплозащитного покрытия относительно максимума теплового воздействия на вращающихся телах и по соответствующим значениям аэродинамических коэффициентов, обусловленных асимметрией прогрева и течения. На каждом этапе исследований проводился обзор литературы, подчеркивалась актуальность решаемой задачи, обосновывалась достоверность результатов. Достаточно полный обзор использованных диссертантом источников представлен в первой главе диссертации.

В главе 2 представлены результаты математического моделирования сверх- и гиперзвукового пространственного и осесимметричного обтекания тел в рамках теории пограничного слоя. Используются достаточно полная и апробированная система уравнений и соотношений, учитывающая вдув газов с поверхности тела, классические переменные Дородницына-Лиза, апробированный модифицированный численный метод И.В. Петухова, основанный на использовании неявной, абсолютно устойчивой, двухточечной разностной схемы, что обеспечивало достоверность результатов. Кроме того, несомненным достоинством данной главы является подтверждение достоверности разработанной математической модели и численных результатов путем сравнения с экспериментальными данными, полученными различными авторами для условий сверх- и гиперзвукового обтекания тел, в том числе и для случаев со вдувом газов с поверхности.

В третьей главе исследуются вопросы влияния состава теплозащитных разлагающихся материалов на характеристики сопряженного тепломассообмена при сверхзвуковом пространственном обтекании затупленного тела, влияния на теплообмен пористости и теплофизических свойств проницаемых металлов, выбираемых в качестве материалов защищаемых проницаемых стенок в системах транспирационного охлаждения и влияния на теплообмен в таких системах малых энергетических возмущений (МЭВ). В разделе 3.1 для разработки математической модели сопряженного тепломассообмена с учетом процессов прогрева, фильтрации продуктов разложения теплозащитных материалов и их вдува с поверхности использованы апробированные другими авторами система уравнений пограничного слоя и система уравнений сохранения массы и энергии для реагирующей оболочки тела с соответствующими граничными и замыкающими условиями и соотношениями, а для численного решения систем уравнений использовался метод И.В. Петухова. Это, совместно с непротиворечивостью численных результатов, подтверждает достоверность разработанной математической модели и ее численной реализации. Проведены сравнительные численные исследования и анализ результатов для трех рецептур углепластиковых материалов с различными значениями содержания связующего, кинетических констант разложения и теплофизических характеристик. Эти результаты могут быть использованы при выборе рецептур углепластиковых материалов для тепловой защиты ЛА. В разделе 3.2 для разработки математической модели сопряженного теплообмена при применении систем транспирационного охлаждения использовались формула для относительного теплового потока, полученная В.Д. Совершенным на основе аппроксимационных расчетных зависимостей, а также модификация классической формулы В.П. Мугалева для завесной зоны. Для расчета характеристик теплообмена использовалась замкнутая система уравнений сохранения, граничных условий, соотношений, включая закон Дарси. Краевая задача решалась численно при помощи локально-одномерного метода расщепления с использованием неявной, абсолютно устойчивой, монотонной разностной схемы. Для опорного варианта проведено тестирование численного метода. В рамках двухтемпературной

проницаемой инертной среды проведено теоретическое исследование системы транспирационного охлаждения при влиянии МЭВ. Результаты численного решения соответствующей краевой задачи сравнивались с известными экспериментальными данными, что подтверждает достоверность математической модели и численной реализации. С учетом этого полученные в разделе 3.3 результаты исследования влияния пористости и теплофизических свойств некоторых проницаемых металлов на теплообмен в системах транспирационного охлаждения также можно считать достоверными.

В четвертой главе представлены результаты исследований сопряженного тепломассообмена при сверхзвуковом осесимметричном и пространственном обтекании вращающихся ЛА с учетом термохимического разрушения теплозащитных покрытий. Рассматривается ЛА с транспирационным охлаждением лобовой поверхности и с теплозащитным углепластиковым покрытием на боковой конической поверхности. В главе комплексно объединены математические модели и соответствующие численные реализации, представленные в главах 2, 3, с использованием ряда дополнительных моделей, например, для состава реакций на поверхности, соотношений, преобразований. Одним из важнейших результатов данной главы является вывод о том, что аэродинамические силы и моменты движущихся под углами атаки продольно закрученных ЛА, возникающие за счет эффекта Магнуса, значительно меньше сил и моментов, возникающих за счет асимметрии относительно плоскости угла атаки температурных полей в тепловой защите и, соответственно, вдува продуктов разложения.

Все основные результаты, полученные диссертантом, как по отдельным процессам, так и в целом, обладают научной новизной.

Практическая значимость работы также несомненна, так как для тепловой защиты современных проектируемых гиперзвуковых ЛА используются, в основном, углерод-углеродные и углепластиковые материалы, а осесимметричные ЛА имеют закрутку относительно продольной оси и двигаются в плотных слоях атмосферы под переменными углами атаки. Прорабатываются и активные способы защиты.

Автореферат диссертации в достаточной степени отражает ее содержание.

Тема и содержание диссертации соответствуют формуле специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Вместе с тем, следует указать на ряд недостатков.

1. Наряду с углепластиковыми материалами для тепловой защиты могут использоваться и менее теплопроводные стеклопластиковые материалы с аналогичными связующими. Разложение и коксование связующих происходит в диапазоне до 1000°C , а плавление наполнителей и унос массы с поверхности стеклопластиковых материалов происходит при температурах, больших 2000°C . До достижения этой температуры процессы вдува продуктов разложения связующих аналогичны, и можно было указать применимость в данном диапазоне результатов исследований и для случаев стеклопластиковых материалов.

2. Не использована возможность дополнительного подтверждения достоверности результатов путем сравнения с аналитическим решением квазистационарной задачи теплопроводности при гармоническом изменении граничного условия, в том числе и для смещения максимума температуры поверхности по фазе относительно максимума теплового воздействия в зависимости от угловой скорости вращения.

3. В главе 3 разделы 3.2 и 3.3 можно было бы объединить и сделать общую постановку задачи как с МЭВ, так и без МЭВ, с сохранением результатов численных исследований, что сократило бы объем работы.

4. Представленная на рисунке 2.8 большая относительная погрешность справедливо объясняется диссертантом тем, что не достигается полная турбулентность течения. В использованном при расчетах критерии отыскания начала переходного участка $Re^{**} = 200\exp(0.157Me)$ предэкспонентный множитель равен 200 и соответствует некоторому осредненному значению, полученному по экспериментальным данным. В критерии данного вида предэкспонентный множитель характеризует влияние свойств поверхностей (шероховатости, температуры, вдува), и на лобовых поверхностях он может иметь и меньшие значения. Соответственно и погрешность будет меньше даже при малых радиусах притупления.

