

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор – проректор по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана

доктор технических наук, старший научный сотрудник



Зимин Владимир Николаевич

» ноября 2018 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

на диссертацию **Овчинникова Вячеслава Александровича** «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

**Актуальность темы.** Движение летательных аппаратов (ЛА) в атмосфере сопровождается интенсивным аэродинамическим нагревом. Несмотря на многолетнюю историю преодоления «теплового барьера» многие важные вопросы тепловой защиты ЛА все еще недостаточно разработаны. К числу таких вопросов относится вопрос об учете влияния вращения осесимметричных тел, типа полусферически затупленного конуса, совершающего полет с гиперзвуковой скоростью под углом атаки на характер протекающих тепломассообменных процессов на поверхности и в объеме теплозащитных покрытий. Данная

проблематика находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения), а, следовательно, тема диссертационной работы Овчинникова В.А. является актуальной.

**Структура и содержание.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 215 наименований, двух приложений с описанием программного комплекса и титульными листами РИД (всего 166 стр. текста).

Введение (10 стр.) содержит изложение выносимых на защиту положений.

Первая глава (26 стр.) носит обзорно-аналитический характер. В ней дан обзор литературы по вопросам гиперзвукового обтекания и тепловой защиты тел с учетом вращения, шероховатости поверхности при наличии и отсутствии термохимического разрушения ТЗМ, а также отмечена важность исследований малых энергетических возмущений в задачах проектирования тепловой защиты.

Во второй главе (22 стр.) отражено математическое моделирование сверх- и гиперзвукового обтекания тел в рамках теории турбулентного пограничного слоя. Проведено сравнение результатов расчетов трехмерного и осесимметричного обтекания на изотермической поверхности с известными экспериментальными и численными данными других авторов.

Третья глава (32 стр.) посвящена математическому моделированию процессов тепло-массообмена в системах активной и пассивной тепловой защиты. Оценено влияние теплофизических и термокинетических параметров теплозащитных материалов на характеристики сопряженного теплообмена и разрушения тела, обтекаемого высокоэнтальпийным потоком. С использованием двухтемпературной модели пористой инертной среды исследовано влияние пульсаций потока газоохладителя, пористости и теплофизических свойств материала на процесс теплообмена в системах транспирационного охлаждения.

В четвертой главе (32 стр.) в сопряженной постановке исследовано влияние абляции теплозащитного материала на характеристики сопряжённого тепломассообмена при сверхзвуковом пространственном обтекании при наличии и отсутствии вращения сферически затупленного конуса. Представлены результаты численного исследования аэродинамических характеристик сферически затупленного тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком воздуха под углом атаки, с учетом вращательного движения тела вокруг продольной оси, аэродинамического нагрева, термохимического разложения углеродистого материала и асимметрии течения в пограничном слое.

Заключение на трех страницах суммирует выводы по работе.

Объем 2–4 глав, содержащих постановку и результаты расчетно-теоретических исследований приблизительно в 3,3 раза превышает объем первой главы.

#### **Научная новизна**

1. Разработана математическая модель и методика расчета, с помощью которых впервые численно проанализировано влияние вращательного движения тела на характеристики нестационарного тепломассообмена в рамках сопряженной постановки с учетом ламинарного, переходного, турбулентного режимов течения в пограничном слое, термохимического разрушения теплозащитного покрытия при гиперзвуковом обтекании тела под ненулевым углом атаки.

2. Впервые численно определены и проведено сравнение аэродинамических сил и моментов, возникающих вследствие одновременного воздействия вращения тела вокруг продольной оси, с силами и моментами, обусловленными асимметрией течения около изотермической поверхности в пограничном слое при сверхзвуковом пространственном обтекании сферически затупленного конуса.

3. Впервые численно определены характеристики асимметрии теплового поля и скорости массового уноса на аблирующей поверхности теплозащитного углеродного материала, возникающей в условиях вращения и гиперзвукового обтекания сферически затупленного конуса под углом атаки.

**Практическая значимость** работы заключается в создании пакета программ для моделирования процессов теплообмена вращающихся осесимметричных тел, совершающих полет в атмосфере под углом атаки с гиперзвуковой скоростью.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на ряде представительных научных конференциях и опубликованы в 8 статьях из списка ВАК.

**Достоверность** полученных результатов обоснована применением фундаментальных законов сохранения массы, импульса, энергии, апробированных на практике феноменологических моделей и численных методов решения, удовлетворительным сопоставлением расчетно-теоретических и экспериментальных данных.

**Наиболее значимыми новыми и практически полезными результатами диссертации** являются:

1. Решена задача аэродинамического нагрева сферически затупленного конуса при гиперзвуковом пространственном обтекании потоком химически равновесного воздуха с учетом термохимического разрушения ТЗП при скоростях вращения тела от 0 до 500 градус/с. Установлено, что при движении затупленного конуса под углом атаки 5 градусов и его вращении вокруг своей продольной оси с угловой скоростью 50 градус/с перепад температур на поверхности из графита В-1 уменьшается с 1004 К до 327 К, а на поверхности из углепластика – с 688 К до 526 К.

2. Численно установлено, что вращение сферически затупленного конуса, обтекаемого гиперзвуковым потоком газа под углом атаки, приводит к асимметрии распределения температуры поверхности и скорости уноса материала. В диапазоне скоростей вращения от 0 до 500 градус/с фазовый сдвиг между давлением и температурой поверхности монотонно зависит от  $\omega$ .

3. В результате численного моделирования установлено, что величина тепловой асимметрии на поверхности затупленного конуса зависит от его скорости вращения нелинейно и немонотонно. Получено, что максимум величины тепловой асимметрии

для графита В-1 достигается при меньшей скорости вращения (25 градус/с), чем для углепластика. Величина тепловой асимметрии при скоростях вращения до 100 градус/с для графита больше, чем для углепластика.

4. В результате численного решения сопряженной задачи тепломассообмена при сверхзвуковом пространственном обтекании вращающегося сферически затупленного конуса с учетом термического разложения углепластика показано, что при  $\Omega = 7,9 \cdot 10^{-6}$  асимметрия температуры и скорости массового уноса с поверхности влияет на боковую силу, моменты крена и рыскания существенно сильнее, чем асимметрия течения в пограничном слое.

Выявленные закономерности и разработанные инструментальные средства исследований могут быть использованы в ряде НИР и ОКР предприятий, подведомственных ГК Роскосмос, Ростехнология и др.

**Замечания:**

1. Название работы является слишком общим и не отражает особенностей решаемой научной задачи.

2. Цель работы сформулирована таким образом, что на первом месте в ней выделено создание инструментальных средств исследования (алгоритмов и программ), хотя, по нашему мнению, в первую очередь, должна быть направлена на достижение новых более полных и точных научных результатов в выбранной предметной области. Кстати, при такой формулировке цели автору следовало бы продемонстрировать преимущества разработанного программного обеспечения по сравнению с распространенными коммерческими программами.

3. Во введении и первой обзорно-аналитической главе автор недостаточно полно осветил вклад предшественников в решение проблемы «теплового барьера» и не определил свое место в общем ряду.

4. Уравнения сохранения в пограничном слое, приведенные в диссертации и автореферате, не содержат членов, которые учитывают радиационный теплообмен в пограничном слое.

5. Постановки решаемых задач не учитывают изменение геометрии затупленного конуса при разрушении ТЗП, так называемом обгаре.

6. Система уравнений 3.9-3.11 в параграфе 3.1 (с. 64–65), описывающая закон сохранения массы и энергии для реагирующей оболочки тела, не учитывает кривизну поверхности тела, которое, как утверждает автор, имеет вид сферически затупленного конуса. Не приведены обоснования применимости данных уравнений, описывающих одномерный перенос тепла, в задаче пространственного обтекания.

7. Имеются недостатки в оформлении работы, в частности:

- в § 4.3 не все величины определены, на стр. 115 не указано, что означают величины  $A_{ci}$ ,  $R_i$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  и как они определяются;

- условия сопряжения на поверхности тела в диссертации (с. 113–114, формулы (4.33), (4.34)) и автореферате (с. 14–15, формулы (20), (21)) не соответствуют друг другу. В автореферате не приведены условия сопряжения для массового расхода.

- левая и правая части формулы на с. 115  $m_w = \sum_{i=1}^8 c_{iw} / m_i$  имеют различные размерности.

**Автореферат** соответствует диссертации и достаточно полно отражает ее содержание.

**Заключение.** Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Овчинникова В.А. заслуживает общей положительной оценки. Она является законченным научным исследованием, в котором с помощью численного моделирования исследованы физические механизмы теплообмена для разрушающихся и неразрушающихся покрытий на осесимметричных вращающихся телах при гиперзвуковых скоростях полета. Представленная работа содержит новые результаты в области механики газа и теплообмена, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а ее автор, Овчинников Вячеслав Александрович,

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Диссертация Овчинникова В.А. «Математическое моделирование аэродинамических процессов и тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов» обсуждена на заседании кафедры ракетно-космических композитных конструкций 16 ноября 2018 года (протокол № 9).

Заведующий кафедрой ракетно-космических композитных конструкций МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук (05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов), профессор

Резник Сергей Васильевич

Профессор кафедры ракетно-космических композитных конструкций МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук (05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем, 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов), доцент

Просунцов Павел Викторович

Подписи С.В. Резника и П.В. Просунцова заверяю



ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА  
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
НАЗАРОВА О. В.  
ТЕЛ. 8-499-263-60-48

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1; тел.: (499) 261-1743,  
e-mail: bauman@bmstu.ru, сайт: <http://www.bmstu.ru>