

На правах рукописи



**Овчинников Вячеслав Александрович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ТЕПЛОЙ ЗАЩИТЫ  
ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

**Научный руководитель:** доктор технических наук, старший научный сотрудник **Якимов Анатолий Степанович**

**Официальные оппоненты:**

**Зудов Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики быстропотекающих процессов, ведущий научный сотрудник

**Костин Геннадий Федотович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Южно-Уральский научный центр», Отдел фундаментальных проблем аэрокосмических технологий, старший научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится 20 декабря 2018 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 36 (корпус № 10 (НИИ ПММ), аудитория 239).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [www.tsu.ru](http://www.tsu.ru)

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/OvchinnikovVA20122018.html>

Автореферат разослан «\_\_» октября 2018 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Пикущак  
Елизавета Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы и степень разработанности.** Активное развитие гиперзвуковых технологий выдвигает на первый план проблему тепловой защиты летательного аппарата (ЛА). При полете с гиперзвуковой скоростью корпус ЛА подвергается интенсивному аэродинамическому нагреву, который приводит к существенному росту температуры, термохимическому разрушению, изменению формы тела и характеристик материала, таких как прочность, упругость. Вследствие этого снижаются аэродинамические характеристики ЛА и его способность совершать длительный полет по траектории.

Воздействие аэродинамического нагрева распределено по поверхности крайне неравномерно. Наиболее сильным тепловым нагрузкам подвергается головная часть ЛА. При пространственном обтекании тела между наветренной и подветренной сторонами также имеется существенный перепад температуры. Вследствие этого разрушение материала происходит несимметрично относительно продольной оси ЛА. В виду специфических условий полета в атмосфере, особенностей задач и конструкций ЛА необходимо применять разнообразные методы тепловой защиты конструкционных элементов ЛА. Для тепловой защиты ЛА на наиболее теплонапряженных участках можно использовать вдув газа-охладителя с целью ослабления тепловых потоков к телу и переноса тепла из глубины материала при фильтрации газа в порах. Применение вращения ЛА вокруг продольной оси обеспечивает защиту теплозащитного материала боковой поверхности от перегрева на наветренной стороне при обтекании гиперзвуковым потоком газа под ненулевым углом атаки. Однако при этом возникает тепловая и гидродинамическая асимметрия относительно плоскости угла атаки, приводящая к появлению боковой силы, отклоняющей тело от естественной траектории движения и вязкостному демпфированию, уменьшающему скорость вращения.

В связи с этим практический интерес представляет исследование комбинированной пассивной тепловой защиты, совместного влияния на характеристики теплообмена (ТМО) факторов, связанных со вдувом газа-охладителя через проницаемую поверхность, термохимическим разрушением теплозащитного материала, вращательным движением гиперзвукового ЛА относительно продольной оси тела.

Важность учета взаимосвязанности процессов в газовой и твердой фазах при исследовании теплообмена тела с набегающим потоком газа впервые показана в работах А. В. Лыкова. Существенный вклад в изучение проблемы внесли научные исследования А.М. Гришина, А.Ш. Дорфмана, В.И. Зинченко, Ф.М. Фомина и др., в которых рассматривались сопряженные задачи теплообмена с учетом неравновесных химических реакций и разрушения тела, а также приводились условия квазистационарности процессов теплообмена в реагирующих средах. Использование сопряженного подхода существенным образом усложняет решение задачи и

требует больших вычислительных мощностей из-за необходимости совместного решения систем дифференциальных уравнений для газовой и твердой фаз. Поэтому в значительной части эти исследования охватывают только условия, когда ориентация тела относительно набегающего потока остается неизменной и тело не совершает движение вокруг своего центра масс. Определенные исследования влияния вдува продуктов разложения углепластиковых ТЗП на момент крена осесимметричных вращающихся ЛА, обтекаемых под углом атаки, проводились А.Я. Гофманом, М.Г. Булыгиным, В.И. Зинченко, Ю.М. Ковалевым, Г.Ф. Костиным, Ю.А. Мокиным, В.В. Несмеловым, Н.Н. Тихоновым с использованием приближенной аналитической методики решения задачи. Дальнейшие исследования требуют необходимости разработки рациональных физико-математических моделей с соответствующими методами и математическими технологиями, позволяющими существенным образом сокращать время проведения расчетов и проводить отработку гиперзвуковых ЛА с использованием комбинированной тепловой защиты с учетом вращательного движения вокруг продольной оси, колебательного движения вокруг центра тяжести и поступательного движения при переменных условиях набегающего потока.

**Цель** диссертационной работы состояла в разработке алгоритмов, создании программ и параметрическом исследовании характеристик сопряженного ТМО в рамках теории пограничного слоя (ПС) при сверх- и гиперзвуковом пространственном обтекании сферически затупленных конусов с учетом вдува газа с поверхности тела, термохимического разрушения, вращательного движения тела, а так же в изучении активных и пассивных систем тепловой защиты ЛА при наличии малых возмущающих воздействий.

#### **Задачи исследования:**

- обзор современных исследований и достижений по теме работы.
- математическое моделирование аэродинамических и ТМО процессов в задаче полета вращающегося осесимметричного тела в атмосфере Земли.
- разработка методики решения сопряженной задачи ТМО при гиперзвуковом обтекании вращающегося ЛА.
- сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными и численными данными других авторов и проверка методики решения задачи на сеточную сходимость.
- численное исследование влияния пористости и теплофизических свойств некоторых проницаемых металлов на теплообмен в системах транспирационного охлаждения. Численное исследование воздействия малых энергетических возмущений на тепловую защиту.
- численное моделирование процессов сопряженного тепломассообмена при сверх- и гиперзвуковом обтекании химически равновесным потоком воздуха сферически затупленного конуса под ненулевым углом атаки с учетом вращательного движения и термохимического разрушения теплозащитного покрытия (ТЗП).

**Объектом исследования** является гиперзвуковое обтекание ЛА, системы активной, пассивной и комбинированной тепловой защиты и их восприимчивость к малым возмущающим воздействиям.

**Научная новизна.** Новизна полученных результатов заключается в том, что в диссертационной работе:

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

2. Впервые численно определены и сравнены аэродинамические силы и моменты, возникающие вследствие одновременного воздействия вращения тела вокруг продольной оси, аэродинамического нагрева, термического разложения углерода (УП), с силами и моментами, обусловленными асимметрией течения около изотермической поверхности в ПС при сверхзвуковом пространственном обтекании сферически затупленного конуса.

3. Проведены численные исследования новых теплозащитных материалов на основе УП с различной массовой долей фенолформальдегидного связующего в условиях аэродинамического нагрева при сверхзвуковом пространственном обтекании и термическом разложении.

4. Впервые численно исследовано влияние скорости осевого вращения на фазовый сдвиг между давлением и температурой поверхности теплозащитного углеродного материала при термохимическом разрушении и движении сферически затупленного конуса с гиперзвуковой скоростью.

5. 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.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовались методы математического моделирования, методы интегрального и дифференциального исчисления, теория сплайнов, численный метод четвертого порядка аппроксимации для решения систем дифференциальных уравнений, описывающих течение в ПС.

**Теоретическая и практическая значимость.** Полученные результаты дополняют теоретические представления об аэродинамических и теплообменных процессах, протекающих при пространственном сверхзвуковом обтекании вращающегося ЛА в условиях термохимического разрушения ТЗП.

Разработанный комплекс программ, позволяющий определять тепловые и аэродинамические характеристики обтекаемого тела в широком диапазоне определяющих параметров, может быть использован при проектировании,

создании и оценке эффективности различных способов тепловой защиты перспективных гиперзвуковых ЛА.

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся:

1. Комплексная математическая модель, алгоритм и методика расчета нестационарного сопряженного тепломассообмена при гиперзвуковом пространственном обтекании вращающегося сферически затупленного конуса потоком вязкого сжимаемого газа с учетом термохимического разрушения ТЗП.

2. Результаты численного расчета значений аэродинамических сил и моментов, возникающих вследствие одновременного воздействия вращения тела вокруг продольной оси, аэродинамического нагрева, термического разложения УП и асимметрии течения в ПС при сверхзвуковом пространственном обтекании.

3. Результаты численного исследования влияния состава теплозащитного материала на основе УП на характеристики сопряженного тепломассообмена при сверхзвуковом обтекании затупленного тела.

4. Результаты численного исследования влияния угловой скорости вращения на фазовый сдвиг между давлением и температурой поверхности теплозащитного углеродного материала при движении тела с гиперзвуковой скоростью.

5. Результаты численного расчета асимметрии теплового поля и скорости уноса массы на аблирующей поверхности теплозащитного углеродного материала, возникающей в условиях вращения и гиперзвукового обтекания затупленного тела под углом атаки.

**Достоверность** и обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертационной работе, следуют из адекватности используемых физических и математических моделей, результатов сравнения численных расчетов с известными экспериментальными данными, а также подтверждаются проверкой решения задачи сеточной сходимостью.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в данной работе, были апробированы на следующих конференциях: XV Минский международный форум по тепломассообмену, 23–26 мая 2016 г., доклады «Математическое моделирование процесса теплообмена систем пористого охлаждения при влиянии пульсаций газа-охлаждителя», «Численное исследование характеристик сопряженного ТМО при гиперзвуковом пространственном обтекании вращающегося сферически затупленного тела и вдуве газа с поверхности», НАН и ИТМ НАН Белорусии, г. Минск; XX Всероссийская научная конференция с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии», 21–23 сентября, 2016 г., доклад «Моделирование влияния вращения затупленного тела на характеристики сопряженного тепломассообмена при движении со сверхзвуковой скоростью», НИ ТГУ, г. Томск; IX Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 21–25 сентября 2016 г., доклад «Программа расчёта сопряженного теплообмена затупленного тела

при его спуске в атмосфере с переменным углом атаки», НИИ ПММ ТГУ, г. Томск; XII Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», 25–28 апреля 2016 г., доклад «Влияние состава теплозащитного материала на теплообмен тела при сверхзвуковом пространственном обтекании», НИ ТПУ, г. Томск; X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 24–30 августа 2011 г., доклад «Аэродинамика и сопряженный теплообмен затупленных тел при сверхзвуковом обтекании с учетом осложняющих факторов», НГУ, г. Нижний Новгород; Всероссийская конференция по математике и механике, 02–04 октября 2013 г., доклад «Сопряженный теплообмен при сверхзвуковом обтекании вращающихся тел под углом атаки», НИ ТГУ, г. Томск.

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 31 работа, в том числе 8 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, индексируемом Web of Science, и 5 статей в российских научных журналах, переводные версии которых индексируемых Web of Science), 4 статьи в научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus, 3 статьи в научных журналах, 14 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций и форума, получены 2 свидетельства о регистрации электронных программ для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 215 наименований и 2 приложений, содержит 50 рисунков, 7 таблиц. Общий объем работы 166 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость, перечислены выносимые на защиту положения, изложено краткое содержание работы.

**В первой главе** дан краткий обзор литературных источников по вопросам сверхзвукового (гиперзвукового) обтекания и тепловой защиты тел при наличии вращения, разрушения материала и их воздействия на аэродинамические и теплообменные процессы.

**Вторая глава** посвящена математическому моделированию сверх- и гиперзвукового пространственного и осесимметричного обтекания тел в рамках теории турбулентного ПС.

В параграфе 2.1 приведена математическая модель сверх и гиперзвукового пространственного обтекания сферически затупленного конуса химически равновесным потоком воздуха. Используя гипотезы «пассивности» и равенства чисел Льюиса для всех компонентов равными

единице, система стационарных уравнений пространственного ПС в естественной системе координат, нормально связанной с внешней поверхностью обтекаемой оболочки, имеет вид<sup>1</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial s}(\rho u r_w) + \frac{\partial}{\partial n}(\rho v r_w) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho w) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{w}{r_w} \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{w^2}{r_w} \frac{\partial r_w}{\partial s} \right) = - \frac{\partial P_e}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial n} \left( \mu_\Sigma \frac{\partial u}{\partial n} \right), \quad (2)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial s} + v \frac{\partial w}{\partial n} + \frac{w}{r_w} \frac{\partial w}{\partial \eta} + \frac{uw}{r_w} \frac{\partial r_w}{\partial s} \right) = - \frac{1}{r_w} \frac{\partial P_e}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial n} \left( \mu_\Sigma \frac{\partial w}{\partial n} \right), \quad (3)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial H}{\partial s} + v \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{w}{r_w} \frac{\partial H}{\partial \eta} \right) = \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \frac{\mu_\Sigma}{Pr_\Sigma} \left[ \frac{\partial H}{\partial n} + (Pr_\Sigma - 1) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{u^2 + w^2}{2} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

$$P = \rho h(\gamma_{ef} - 1) / \gamma_{ef}, \quad P = P_e(s, \eta), \quad (5)$$

$$H = h + (u^2 + w^2) / 2; \quad \mu_\Sigma = \mu + \Gamma \mu_T, \quad Pr_\Sigma = \frac{(\mu + \Gamma \mu_T) Pr Pr_T}{\mu Pr_T + \Gamma \mu_T Pr}.$$

Граничные условия в газовой фазе записываются следующим образом: на внешней границе ПС при  $n \rightarrow \infty$

$$u \rightarrow u_e(s, \eta), \quad w \rightarrow w_e(s, \eta), \quad h \rightarrow h_e(s, \eta), \quad (6)$$

где  $P_e, u_e, w_e, h_e$  определяются из решения системы уравнений Эйлера;

на поверхности обтекаемого тела при  $n \rightarrow 0$

$$u(s, \eta) = 0, \quad w = \omega r_w, \quad v = v_w. \quad (7)$$

Здесь и ниже  $u, v, w$  – компоненты вектора среднemasовой скорости в естественной системе координат  $(s, n, \eta)$ ,  $\Gamma$  – коэффициент перемежаемости,  $H, h$  – полная и статическая энтальпия,  $R_N$  – радиус сферического затупления,  $\omega$  – угловая скорость вращения вокруг продольной оси тела. Индексы  $e, eo$  и  $w$  соответствуют величинам на внешней границе ПС, на внешней границе в точке торможения и на поверхности обтекаемого тела.

Система уравнений пространственного ПС решалась с учетом ламинарной, переходной и турбулентной областей течения. Для описания турбулентного течения применялась трехслойная алгебраическая модель турбулентности, учитывающая наличие ламинарного вязкого подслоя, внутренней области турбулентного ядра, которая описывается формулой Ван-Драйста-Себеси, и внешней области, в которой используется формула Сполдинга. Энтальпия  $h(T, P)$  в формулах (5) в зависимости от температуры  $T$  и давления  $P$  находилась из таблиц термодинамических функций воздуха.

<sup>1</sup> Зинченко В.И. Математическое моделирование сопряженных задач теплообмена / В.И. Зинченко – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1985.– 221 с.



В параграфе 2.3 представлена методика решения системы уравнений трехмерного ПС в переменных Дороднищина-Лиза:

$$\xi = \frac{s}{R_N}; \quad \eta = \varphi; \quad \zeta = u_e \sqrt{\frac{a}{a_{11}}} \frac{1}{N} \int_0^n \rho dn, \quad \text{где } N = \left( 2R_N \int_0^{\xi} \rho_e \mu_e u_e a_{22} d\xi \right)^{0.5}. \quad (8)$$

Для численного решения уравнений трехмерного течения (1)–(4) использовался модифицированный метод Петухова<sup>2</sup>, основанный на использовании неявной, абсолютно устойчивой, двухточечной разностной эрмитовой схемы, имеющей четвертый порядок аппроксимации в поперечном направлении и первый – в продольном и окружном.

В параграфе 2.4 приведено тестирование разработанного программного обеспечения путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными и расчетными данными для задачи пространственного и осесимметричного обтекания сферически затупленных конусов на изотермической поверхности [G.F. Widhopf, 1971; R. Hall, 1972; R. Feldhuhn, 1976]. Результаты расчетов сверх- и гиперзвукового обтекания затупленного тела под ненулевыми углами атаки на изотермической поверхности тестировалось по конвективному тепловому потоку в точке торможения и по максимальному значению в области турбулентного течения, которые рассчитывались с помощью известных инженерных формул [J.A. Fay, F.R. Riddell, 1958; W. Hankey, 1988]. Для проверки методики численного решения системы уравнений ПС на сходимость использовалась последовательность сгущающихся равномерных сеток по координате нормальной к поверхности тела.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию процессов ТМО в системах активной и пассивной тепловой защиты.

В параграфе 3.1 приведены результаты расчетов сопряженного ТМО при сверхзвуковом пространственном обтекании сферически затупленного тела для трех модификаций ТЗМ (см. табл. 1) на основе УП с различной долей фенолформальдегидного связующего и углеродной ткани. Оценено влияние теплофизических и термокинетических параметров ТЗМ на характеристики нестационарного теплообмена и разрушения тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком воздуха.

Расчеты обтекания затупленного конуса проводились при следующих параметрах:  $M_\infty = 5$ ;  $R_N = 0,0508$  м; угол полураствора конуса  $\theta = 9^\circ$ , угол атаки  $\beta = 10^\circ$ ; толщина оболочки  $L = 0,01$  м; начальная температура  $T_0 = 293$  К;  $\varepsilon = 0,9$ .

На рис. 1 показано влияние аэродинамического нагрева на скорость массового уноса газообразных компонентов в условиях полета на высоте  $Z = 20$  и  $Z = 40$  км при использовании ТЗМ, представленных в таб. 1.

<sup>2</sup> Петухов И.В. Численный расчет двумерных течений в пограничном слое / И.В. Петухов // Числ. методы решения диф. интегр. уравнений и квадратурные формулы. – М.: Наука, 1964. – С. 304-325.

На рис. 2 представлено влияние термического разложения ТЗМ на температуру поверхности тела в критической точке при  $Z = 40$  км. Здесь  $\Delta T_w = T_{iw} - T_w$ , где температура  $T_{iw}$  получена без учета термического разложения ТЗМ.

Таб. 1 – Теплофизические и термокинетические параметры УП

	№ 1	№ 2	№ 3
$\rho_s, \text{кг/м}^3$	1350	1380	1400
$c_{ps}, \text{Дж/(кг} \cdot \text{м}^3)$	850	986	950
$\lambda_s, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	0,48	0,9	0,448
$k_0 \cdot 10^{-4}, \text{с}^{-1}$	3,15	3,15	3,15
$Q \cdot 10^{-5}, \text{Дж/кг}$	3,35	3,35	12,6
$E \cdot 10^{-4}, \text{кДж/моль}$	8,3	8,3	7,54
Массовая доля смолы, %	42	34,76	7,14

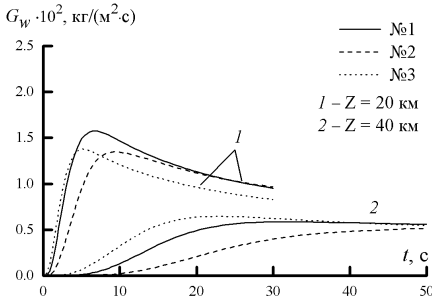


Рис. 1 – Зависимость скорости массового уноса продуктов пиролиза от времени ( $s/R_N = 0$ )

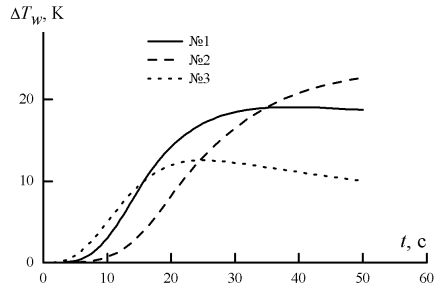


Рис. 2 – Влияние массового расхода продуктов пиролиза на температуру поверхности тела

В параграфе 3.2 в рамках двухтемпературной инертной пористой среды приведено численное исследование процесса ТМО в системах транспирационного охлаждения при наличии малых периодических возмущений газа-охладителя и изучено их влияние на интенсивность процесса теплообмена. Оценено влияние интенсивности пульсации в рамках определенного диапазона на расход газа-охладителя и температуру ТЗМ (пористая сталь). Определено значение интенсивности пульсаций, при которой расход газа-охладителя по сравнению с отсутствием пульсаций снижается, а нагрев материала соответственно усиливается. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными<sup>3</sup>.

В параграфе 3.3 представлена двухтемпературная модель<sup>3</sup> для исследования влияния пористости и теплофизических свойств проникаемых металлов (стали, вольфрама, молибдена) при наличии вдува газа-охладителя

<sup>3</sup> Гришин А.М. Математическое и физическое моделирование тепловой защиты / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, В.И. Зинченко, К.Н. Ефимов, А.С. Якимов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. – 358 с.

на теплообмен. Предполагалось, что тело при взаимодействии с потоком газа не разрушается, отсутствуют гетерогенные и гомогенные химические реакции и фазовые переходы, состав вдуваемого газа и газа в набегающем внешнем потоке одинаков. Проведено исследование влияния теплопроводности и пористости материала на расход газа-охладителя и температуру внешней поверхности ТЗМ. Приведены распределения температуры каркаса и газа по глубине слоя ТЗМ. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными<sup>3</sup>.

**Четвертая глава** посвящена численному исследованию характеристик сопряженного ТМО при сверхзвуковом осесимметричном и пространственном обтекании сферически затупленного тела при наличии вращательного движения вокруг продольной оси.

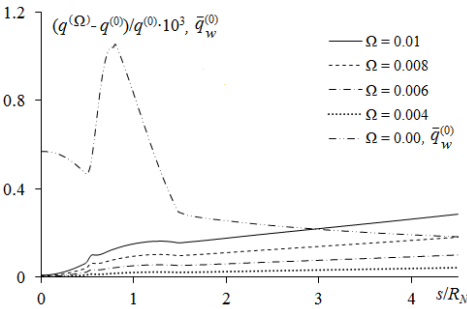


Рис. 3 – Зависимость распределения теплового потока по продольной координате  $\xi$  от параметра вращения  $\Omega$

В параграфе 4.1 проведено параметрическое исследование влияния скорости вращения на тепловой поток, продольную и окружную компонент трения при осесимметричном обтекании вращающегося сферически затупленного конуса ( $M_\infty = 5$ ;  $Re = 3,78 \cdot 10^6$ ). Предполагалось, что поверхность тела изотермическая. Из рис. 3 видно, что при достаточно малых параметрах вращения  $\Omega = \omega R_N / v_m$  тепловой поток на поверхности

тела можно определять из предположения  $\Omega = 0$ .

Величина безразмерного теплового потока, представленная на рис. 3, определяется по формуле:

$$\bar{q}_w = k_e \frac{l_w}{Pr_w} \left( \frac{\partial g}{\partial \zeta} - \frac{w_w^2}{H_e} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \zeta} \right)_{w_w}, \quad k_e = \sqrt{\frac{\rho_e \mu_e}{\rho_{e0} \mu_{e0}} \frac{u_e}{\sqrt{2H_e}} \frac{1}{\alpha_1}};$$

индекс ( $\Omega$ ) соответствует значениям при параметре вращения равном  $\Omega$ ; индекс (0) – при  $\Omega = 0$ . Величина  $(q^{(\Omega)} - q^{(0)})/q^{(0)}$ , приведенная на рис. 3 для  $\Omega > 0$ , характеризует прирост теплового потока за счет вращения по сравнению со случаем невращающегося тела.

На основе проведенных расчетов получена аппроксимационная формула:

$$\frac{q^{(\Omega)} - q^{(0)}}{q^{(0)}} = \frac{2\Omega^2 r_w}{(1 - T_w/T_{e0})^{0.9}} \bar{\xi} + 1.25, \quad \bar{\xi} = (\xi - \pi/2 + \theta + 0.6(1 - T_w/T_{e0})) \sin \theta,$$

позволяющая оценивать влияние вращения на аэродинамический нагрев.

В параграфе 4.2 проведено численное исследование влияния угловой скорости вращения сферически затупленного конуса на значения аэродинамических сил и моментов, возникающих вследствие асимметрии

течения в ПС и теплового поля внутри тела относительно плоскости угла атаки, при следующих предположениях:

1) Малость характерной линейной скорости вращения тела по сравнению со скоростью набегающего потока

$$\Omega = \omega R_N / V_\infty \ll 1; \quad (9)$$

2) Малые углы атаки;

3) Время релаксации газовой фазы  $t_a$  много меньше характерных времен тепловой релаксации твердого тела на поверхности  $t_w$  и колебательных процессов  $t_\omega$

$$t_a \ll t_w, \quad t_a \ll t_\omega,$$

где  $t_a = R_N / V_\infty$ ,  $t_w = 2\pi / \omega$ ,  $t_w = (\rho c_p \lambda) (T_{e0} - T_0)^2 q_*^{-2}$ ,  $q_*$  — характерный конвективный тепловой поток на поверхности тела.

Для ПС на сфере решение искалось в виде

$$\begin{aligned} u &= u_e U_0 - \omega R_N \sin \beta \sin \phi U_1, \\ w &= \omega R_N [W_1 \cos \beta \sin \xi - (U_1 - W_0 \sin \xi) \sin \beta \cos \eta] \end{aligned}$$

на конусе – в следующем виде

$$u = u_e U_0, \quad w = w_e W_0 + \omega r_w W_1.$$

Внутри ТЗП решалась система уравнений, описывающая распространение тепла, термическое разложение материала и фильтрацию газообразных продуктов его разложения<sup>4</sup>. Задача решалась со следующими параметрами:  $M_\infty = 6$ ,  $Re = 8 \cdot 10^5$ ,  $\Omega = 7,9 \cdot 10^{-6}$ ,  $R_N = 0,05$  м,  $\theta = 9^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$ ,  $Z = 20$  км.

На рис. 4 кривая 1 соответствует коэффициенту боковой силы, 2 – коэффициенту момента рыскания, 3 – коэффициенту момента крена.

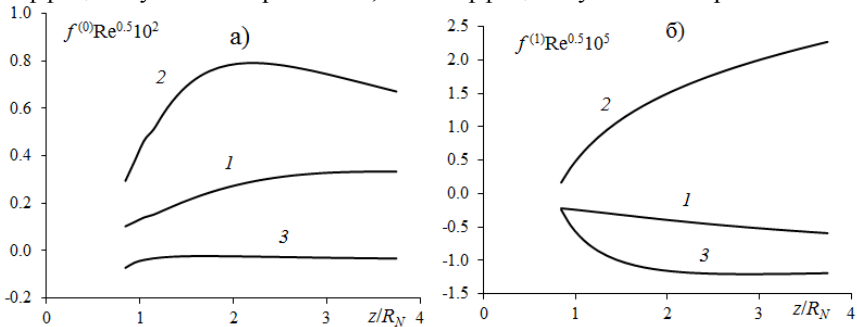


Рис. 4 – Аэродинамические коэффициенты, обусловленные асимметрией прогрева (а) и течения (б).

Здесь  $f^{(0)}$  обусловлено тепловой асимметрией, а  $f^{(1)}$  – асимметрией поля течения в ПС;  $z$  – расстояние вдоль оси вращения от передней точки тела. Видно, что тепловая асимметрия оказывает более существенное влияние на

<sup>4</sup> Зинченко В. И. Влияние массовой доли связующего в теплозащитном покрытии на тепло- и массообмен при взаимодействии с высокоскоростным газовым потоком / В. И. Зинченко, В. В. Несмелов, А. С. Якимов, Г. Ф. Костин // ФГВ. – 1998. – Т. 34, № 6. – С. 48–55.

значения аэродинамических коэффициентов, чем асимметрия течения в ПС.

Параграф 4.3 посвящен численному исследованию влияния скорости вращательного движения ЛА на характеристики тепловой асимметрии. Представлены комплексная математическая постановка задачи и результаты расчетов сопряженного ТМО при гиперзвуковом пространственном обтекании сферически затупленного конуса, вращающегося вокруг продольной оси с постоянной угловой скоростью, при наличии термохимического разрушения ТЗМ. Предполагается, что влияние вращательного движения на граничные условия для газовой фазы (температура поверхности) и для твердой фазы (тепловой поток) мало:

$$\Delta T_w^\Omega = \left| \frac{\partial T_w}{\partial \eta_1} \cdot \omega t_a \right| \ll T_w^*, \quad q^{(\Omega)} - q^{(0)} \ll q^{(0)}.$$

На основании этого предположения и допущений из параграфа 4.2 для описания сверх- и гиперзвукового обтекания использовалась система квазистационарных уравнений пространственного ПС (1)–(4). При этом предполагалось, что можно пренебречь влиянием вращательного движения на нормальный градиент давления и невязкое течение около тела.

Тепловое состояние обтекаемого сферического затупления ( $0 < s_1 < s_A$ ) рассчитывалось с использованием нестационарного уравнения сохранения энергии для проницаемой сферической оболочки в рамках однотемпературной модели и квазистационарного уравнения для скорости фильтрации охлаждающего газа в порак:

$$\frac{\partial(\rho^{(1)} \varphi v^{(1)} r_1 H_1)}{\partial n_1} = 0, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\rho c_p)_1 (1 - \varphi) \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{1}{r_1 H_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial n_1} \left[ r_1 H_1 \lambda_1 (1 - \varphi) \frac{\partial T_1}{\partial n_1} \right] + \frac{\partial}{\partial s_1} \left[ \frac{r_1 \lambda_1}{H_1} (1 - \varphi) \frac{\partial T_1}{\partial s_1} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial \eta_1} \left[ \frac{H_1 \lambda_1}{r_1} (1 - \varphi) \frac{\partial T_1}{\partial \eta_1} \right] \right\} + c_{pg}^{(1)} (\rho v)_w^{(1)} \frac{r_{1w}}{r_1 H_1} \frac{\partial T_1}{\partial n_1}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$A \mu_1 v^{(1)} + B \rho^{(1)} \varphi v^{(1)} \Big|_{v^{(1)}} = - \frac{\partial P}{\partial n_1}, \quad (12)$$

$$P = \rho^{(1)} R T_1 / M, \quad H_1 = (R_N - n_1) / R_N, \quad s = s_1 / R_N, \quad (13)$$

$$r_1 = (R_N - n_1) \sin(s), \quad \mu_1 \sim \sqrt{T_1}, \quad \lambda_1 \sim \sqrt{T_1}, \quad \varphi = \text{const}.$$

Процесс фильтрации вдуваемого газа в направлении нормали к поверхности в рассматриваемой системе координат, связанной с осью симметрии тела, предполагался одномерным.

На внешней и внутренней поверхностях области имеет место равенство давлений в порак и во внешней среде

$$P_w \Big|_{n_1=0} = P_e(s, \eta), \quad P \Big|_{n_1=L_0} = P_{L_0}, \quad (14)$$

Давление на внутренней «холодной» поверхности сферической оболочки ( $n_1 = L_0$ ) задано в виде

$$P_{L_0} = kP_{e0}, \quad (15)$$

где  $k$  – некоторая постоянная. Это обеспечивало необходимый расход охладителя и температуру тела ниже температуры плавления каркаса из пористого металла на протяжении всего времени теплового воздействия.

Уравнения сохранения энергии и массы в подвижной системе координат, связанной с разрушающейся поверхностью, для участков с пассивной тепловой защитой записывается по математическим моделям<sup>5</sup>

$$\begin{aligned} \rho_c c_{p2} \left( \frac{\partial T_2}{\partial t} - \psi \frac{\partial T_2}{\partial n_1} \right) + c_{pg}^{(2)} G \frac{\partial T_2}{\partial n_1} = \frac{\partial}{\partial n_1} \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_1} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial s_1} \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial s_1} \right) + \frac{1}{r_2^2} \frac{\partial}{\partial \eta_1} \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \eta_1} \right) - Q_c \frac{d\rho_c}{dt}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{d\rho_c}{dt} = \left( \frac{\partial \rho_c}{\partial t} - \psi \frac{\partial \rho_c}{\partial n_1} \right) = \begin{cases} -k_c \rho_{c0} \left( \frac{\rho_c - \rho_{c^*}}{\rho_{c0}} \right) \exp \left( -\frac{E_c}{RT_2} \right), & \rho_c > \rho_{c^*}, \\ 0, & \rho_c \leq \rho_{c^*}, \end{cases} \quad (17)$$

$$G = \int_0^l \frac{d\rho_c}{\partial t} dn_1, \quad x(t) = \int_0^t \psi d\tau, \quad \psi = \sum_{i=2}^3 \frac{(\rho\nu)_{iw}}{\rho_{cw}} \quad r_2 = (R_N - n_1) \cos \theta + (s_1 - s_A) \sin \theta,$$

$$l = L_0 - x(t), \quad (\rho\nu)_{1w} = G_w, \quad (\rho\nu)_w^{(2)} = (\rho\nu)_{1w} + (\rho\nu)_{2w} + (\rho\nu)_{3w}. \quad (18)$$

Численное решение трехмерных уравнений (11), (16) проводилось методом расщепления<sup>6</sup>. Использована неявная, абсолютно устойчивая, монотонная разностная схема с суммарной погрешностью аппроксимации  $O(\tau + H_{n_1}^2 + H_{s_1}^2 + H_{\eta_1}^2)$ , где  $H_{n_1}$ ,  $H_{s_1}$ ,  $H_{\eta_1}$  – шаги по пространству вдоль координат  $n_1$ ,  $s_1$  и  $\eta_1$  соответственно,  $\tau$  – шаг по времени.

Начальные условия:

$$T_1|_{t=0} = T_2|_{t=0} = T_0, \quad \rho_c|_{t=0} = \rho_{c0}. \quad (19)$$

На обтекаемой внешней поверхности оболочки ( $n = n_1 = 0$ ) имеют место условия сопряжения

$$\left. \frac{\mu}{Pr} \left( \frac{\partial h}{\partial n} \right) \right|_w - (1 - \phi) \varepsilon_1 \sigma T_{1w}^4 = -\lambda_1 (1 - \phi) \left( \frac{\partial T_1}{\partial n_1} \right) \Big|_w, \quad (20)$$

$$T(s, \eta)|_{-0} = T_1(s, \eta)|_{+0}, \quad 0 \leq s_1 < s_A,$$

<sup>5</sup> Полежаев Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.

<sup>6</sup> Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1971. – 552 с.

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_1} \Big|_{n_1=0-x(t)} = \frac{\mu}{\text{Pr}} \left( \frac{\partial h}{\partial n} \right) \Big|_w - (h_w - h_c) \sum_{i=2}^3 (\rho v)_{iw} - (\rho v)_{1w} (h_w - h_g) - \varepsilon_2 \sigma T_{2w}^4, \quad (21)$$

$$T(s, \eta) \Big|_{-0} = T_2 \Big|_{n_1=0-x(t)}(s, \eta) \Big|_{+0}, \quad s_A \leq s_1 \leq s_k.$$

На внутренней поверхности полусферы и конической части выписываются соотношения:

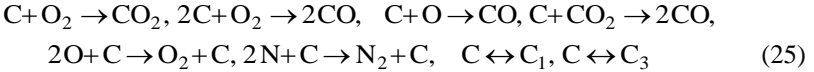
$$\lambda_1 (1 - \varphi) \frac{\partial T_1}{\partial n_1} \Big|_{n_1=L_0} = \delta (T_{1,L_0} - T_0), \quad 0 \leq s_1 < s_A, \quad (22)$$

$$\rho_c \Big|_{n_1=l} = \rho_{c0}, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_1} \Big|_{n_1=l} = 0, \quad s_A \leq s_1 \leq s_k. \quad (23)$$

На кольце сопряжения сфера-конус  $s_1 = s_A$  используются условия идеального контакта, а при  $s_1 = s_k$  – адиабатическое условие:

$$\frac{\lambda_1 (1 - \varphi)}{H_1} \frac{\partial T_1}{\partial s_1} \Big|_{s_1=s_A-0} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial s_1} \Big|_{s_1=s_A+0}, \quad T_1 \Big|_{s_1=s_A-0} = T_2 \Big|_{s_1=s_A+0}, \quad \frac{\partial T_2}{\partial s_1} \Big|_{s_1=s_k} = 0. \quad (24)$$

На границе раздела сред при  $s_1 = s_A$  рассматривалась следующая кинетическая схема протекания неравновесных химических реакций ( $T_w \approx 4000$  К):



Выражение для массовой скорости уноса имеет вид:

$$\begin{aligned} (\rho v)_{2w} &= \rho_w^{(2)} [(m_6/m_2 - 1)c_{2w}B_1 + (2m_5/m_2 - 1)c_{2w}B_2 + \\ &\quad + (m_5/m_1 - 1)c_{1w}B_3 + (2m_5/m_6 - 1)c_{6w}B_4], \\ (\rho v)_{3w} &= \sum_{i=7}^8 \frac{m_i A_{ci} (P_{ci}^* - P_{ci})}{(2\pi RT_{2w} m_i)^{0.5}}, \quad i = 7, 8, \quad P_{ci}^* = 10^5 \cdot \exp(D_i - E_i / T_{2w}), \end{aligned} \quad (26)$$

$$B_i = k_{iw} \exp(-E_{iw} / RT_{2w}), \quad i = \overline{1, 4}, \quad P_{ci} = P_e c_{iw} m_w / m_i, \quad i = 7, 8,$$

$$\rho_w^{(2)} = P_e m_w / (RT_{2w}),$$

$$h_w = \sum_{i=1}^8 h_i c_{iw}, \quad m_w = \sum_{i=1}^8 c_{iw} / m_i, \quad c_{pg}^{(2)} = b_1 + b_2 T_2, \quad h_g = \int_0^{T_2} c_{pg}^{(2)} dT_2.$$

В (25), (26) порядковый номер компонентов соответствует следующему порядку их перечисления: O, O<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>3</sub>.

Балансовые соотношения для массовых концентраций компонент ( $c_{iw}$ ) записывались с использованием закон Фика для диффузионных потоков и аналогии процессов тепло- и массообмена:

$$J_{iw} + (\rho v)_w^{(2)} c_{iw} = R_{iw}, \quad i = \overline{1, 8}, \quad J_{iw} = \beta_i (c_{iw} - c_{ie}), \quad \beta_i = \alpha / c_p, \quad (27)$$

где  $\alpha / c_p$  и  $\beta_i$  – коэффициенты теплообмена и массообмена соответственно.

Считалось, что продукты разрушения слабо разбавляют воздушную смесь в ПС. Это позволяет использовать принятую выше постановку для уравнений в ПС.

Здесь и ниже  $m$  – молекулярная масса,  $r_w$ ,  $r_i$ ,  $i=1,2$ ,  $H_1$  – коэффициенты Ламе,  $(\rho v)_w^{(1)}$  – расход газа-охлаждителя с поверхности сферического затупления,  $(\rho v)_w^{(2)}$  – полный массовый унос с углеродной поверхности конической части тела,  $\phi$  – пористость сферического затупления,  $L$  – толщина оболочки,  $n_1$  – нормаль к поверхности направлена в глубь оболочки,  $\psi$  – линейная скорость перемещения поверхности разрушения,  $x(t)$  – граница раздела газообразной и конденсированной фазы (глубина выгорания),  $c_{iw}$  – массовая концентрация  $i$ -го компонента,  $E_{iw}$ ,  $k_{iw}$ ,  $i=1, \dots, 4$  – энергия активации и предэкспонент  $i$ -ой гетерогенной реакции оболочки конической части тела,  $k_c$ ,  $E_c$  и  $Q_c$  – предэкспонент, энергия активации и тепловой эффект реакции пиролиза. 1, 2 «вниз» – характеристикам сферы и конуса в конденсированной фазе,  $g$  – газовой фазе на сферической и конической части тела,  $\infty$  – величинам набегающего газового потока на бесконечности,  $T$ ,  $0$  – характеристикам турбулентного переноса и начальным условиям,  $L$  – внутренней оболочке сферической части тела,  $k$  – периферийному участку оболочки, (1), (2) «вверх» – характеристикам газовой фазы на сфере и конусе в теле, черта «вверх» – безразмерным параметрам,  $ef$  – эффективной величине,  $c$  – УП,  $*$  – характерная величина.

Система уравнений (1)–(4), (10)–(12), (16), (17) с начальными и граничными условиями (6), (7), (14), (19)–(25) решена численно. Для тестирования процессов взаимодействия высокоэнтальпийных потоков воздуха с графитовыми поверхностями использовались результаты теоретических<sup>7</sup> и обобщенных экспериментальных исследований<sup>8</sup>.

При решении сопряженной задачи использовались различные системы координат в теле  $(s_1, n_1, \eta_1)$  и ПС  $(s, n, \eta)$ , которые из-за вращения движутся относительно друг друга:  $\eta_1 = \eta - \omega t$ . В условиях сопряжения (20), (21) учитывалось, что тепловая нагрузка периодически меняется со временем в системе координат, связанной с телом  $(s_1, n_1, \eta_1)$ , а температура и скорость массового уноса – в системе, связанной с ПС  $(s, n, \eta)$ .

Расчеты обтекания конуса, затупленного по сфере, с углом полураствора  $\theta = 10^\circ$  потоком химически равновесного воздуха под углом атаки  $\beta = 5^\circ$  проводились при следующих параметрах:  $M_\infty = 23,3$ ,  $Re = 7,3 \cdot 10^6$ ,  $H = 21$  км,  $R_N = 0,2$  м,  $L_0 = 0,02$  м. Для графита на конической части тела решается уравнение (16) при  $Q_c = 0$ ,  $G = 0$ . Приводимые ниже результаты получены при  $\phi = 0,34$ ,  $T_0 = 300$  К,  $b_1 = 965,5$ ,  $b_2 = 0,147$ ,  $M = 29$  кг/кмоль,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$

<sup>7</sup> Гофман А.Г. Теоретическое исследование термохимического разрушения графита в высокоэнтальпийном воздухе / А.Г. Гофман, А.М. Гришин // ПМТФ. – 1984. – № 4. – С. 107-114.

<sup>8</sup> Бейкер Р.Л. Влияние неравновесных химических процессов на сублимацию графита / Р.Л. Бейкер // РКТ. – 1977. – Т. 15, № 10. – С. 21-29.



Вт/( $K^4 \text{ м}^2$ ),  $\varepsilon = 0,9$ ,  $P_0 = 10^5 \text{ Н/м}^2$ ,  $\rho_{c0} = 1400 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{c*} = 1300 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$ ,  $k_c = 3,15 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ ,  $E_c = 8,38 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}$ ,  $Q_c = 1,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ . Теплофизические характеристики пористого затупления соответствовали пористой стали:  $\varepsilon_1 = 0,8$ ,  $\lambda_1 = 2,92 + 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $\rho_1 c_{p1} = (1252 + 0,544 \cdot T_1) \cdot 10^3 \text{ Дж/(К} \cdot \text{м}^3)$ ,  $A = 2,3 \cdot 10^{11} \text{ 1/м}^2$ ,  $B = 5,7 \cdot 10^5 \text{ 1/м}$ . Теплофизические характеристики конической части тела отвечают УП<sup>9</sup> или сплошному графиту В-1<sup>10</sup>.

Характерные времена тепловой релаксации при  $q_* = 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T_{e0} - T_0 = 7887 \text{ К}$  имели следующие значения:  $t_{w1} \approx 2,45 \text{ с}$  (пористая сталь),  $t_{w2} \approx 157 \text{ с}$  (графит),  $t_{w3} \approx 3,77 \text{ с}$  (УП). Время релаксации газовой фазы –  $t_a \approx 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ . Характерное время колебательных процессов  $t_\omega > 0,0125 \text{ с}$ . Значение  $\Delta T_w^\Omega \approx 0,08 \text{ К}$  получено при  $\omega = 500 \text{ градус/с}$  и при оценке величины  $|\partial T_w / \partial \eta_1|$  сверху значением  $318 \text{ К/рад}$  согласно распределению  $T_w(\eta)$ , взятому из решения задачи в момент времени  $t = 40 \text{ с}$  при  $\omega = 0 \text{ рад/с}$ .

На рис. 5 показано распределение температуры поверхности для случая  $\omega = 0 \text{ градус/с}$  (а) и  $\omega = 100 \text{ градус/с}$  (б).

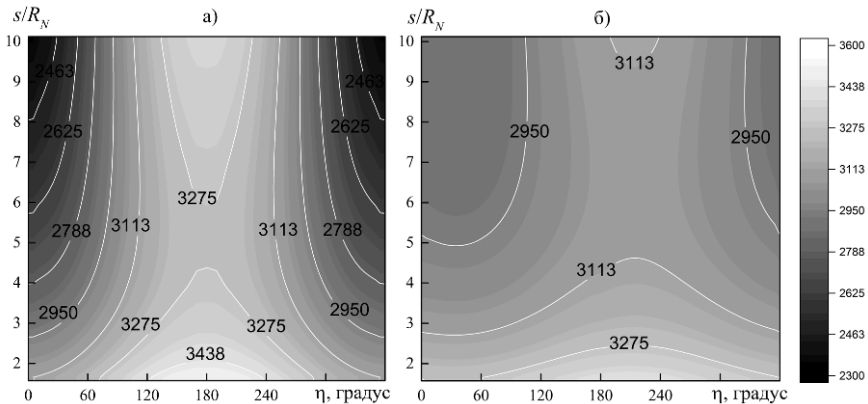


Рис. 5 – Распределение температуры на конической поверхности в момент времени  $t = 40 \text{ с}$  при  $\omega = 0 \text{ градус/с}$  (а) и  $\omega = 100 \text{ градус/с}$  (б). Графит В-1.

Наличие вращательного движения приводит к изменению распределения температуры поверхности. С одной стороны уменьшается перепад температур ( $T_{w\max} - T_{w\min}$ ) вследствие снижения температуры поверхности на наветренной стороне и увеличению – на подветренной. С другой стороны в распределении  $T_w$  возникает асимметрия относительно плоскости угла атаки (см. рис. 5б), т.е. положения максимума и минимума температуры поверхности

<sup>9</sup> Гришин А.М. Термохимическое разрушение углепластика при многократном импульсном нагружении / А.М. Гришин А. Д. Парашин, А. С. Якимов // ФГВ. – 1993. – Т. 29, № 1. – С. 87.

<sup>10</sup> Соседов В.П. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник / В.П. Соседов. – М.: Металлургия, 1975. – 335 с.

смещаются из полуплоскостей  $\eta = 0$  и  $\eta = 180$  соответственно в направлении вращения.

Рассмотрим сечение  $s/R_N = 10,04$  в момент времени  $t = 40$  с. На рис. 6 показано влияние вращения на перепад температур на поверхности тела в сечении продольной координаты  $s/R_N = 10,04$ . Графиту В-1 соответствуют сплошные кривые, УП – штриховые. Кривым  $1-1'$  отвечают максимумы температуры поверхности, кривым  $2-2'$  – минимумы температуры поверхности.

Как видно из рис. 6, с ростом скорости вращения перепад температур уменьшается. Причем изменение скорости вращения по разному сказывается на перепад температур на поверхности графита и на УП: при увеличении значений скорости вращения с 0 до 50 градус/с перепад температур на графите уменьшается с 1004,4 К до 327 К, на УП с 688 К до 526,9 К. Влияние скорости вращения на перепад температур на поверхности тела, характеризуемый кривыми  $1, 2$  (графит) и  $1', 2'$  (УП), уменьшает свой эффект с ростом  $\omega$ .

На рис. 7 представлена зависимость координаты  $\eta_{\max}$ , соответствующей максимальному значению температуры поверхности тела в сечении  $s/R_N = 10,04$ , от скорости вращения тела. Данная координата характеризует несимметричность теплового поля на поверхности теплозащитного материала и указывает на наличие фазового сдвига  $\Delta\eta = \eta_{\max} - 180^\circ$  между изменяющимися во времени температурой и давлением в точке на поверхности вращающегося тела. Это приводит к несимметричности течения около вращающегося тела относительно плоскости угла атаки. Как следствие, вызывает появление отрицательного момента крена, тормозящего вращательное движение тела, и боковой силы, отклоняющей тело от заданной траектории<sup>11,12</sup>.

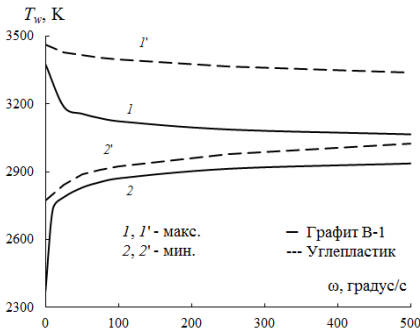


Рис. 6 – Зависимость температуры поверхности тела от скорости вращения в сечении  $s/R_N = 10,04$ .

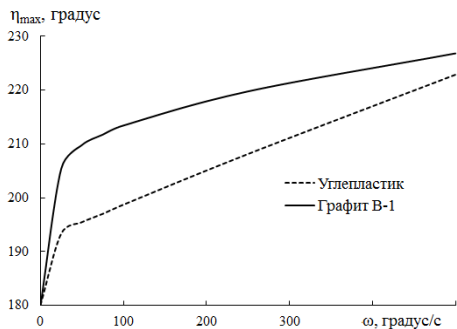


Рис. 7 – Зависимость координаты максимальной температуры поверхности тела от скорости вращения ( $s/R_N = 10,04$ ).

<sup>11</sup> Waterfall A.P. Effect of Ablation on the Dynamics of Spinning Re-Entry Vehicles / A.P. Waterfall // J. Spacecraft and Rockets. – Vol. 6, № 9. – 1969. – P. 1038-1044.

<sup>12</sup> Гольдин В.Д. Сопряженный тепломассообмен при сверхзвуковом обтекании вращающихся тел под углом атаки / В.Д. Гольдин, В.А. Овчинников // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9-3. – С. 49-51.

Значение  $\eta_{\max}$  для УП (штриховая кривая) меньше, чем для графита (сплошная кривая) во всем рассматриваемом диапазоне скоростей вращения. Стоит отметить, что координата  $\eta_{\max}$  зависит от рассматриваемого сечения.

Асимметрия теплового поля характеризуется не только положением точки максимума  $T_w$  относительно плоскости угла атаки ( $\eta = 0^\circ$  и  $\eta = 180^\circ$ ), но так же величиной тепловой асимметрии, которая вычисляется через разность температур в точках симметричных относительно плоскости угла атаки:

$$I(s) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \Psi(s, \eta) d\eta, \quad \Psi(s, \eta) = T_w(s, \eta) - T_w(s, 360 - \eta). \quad (28)$$

На рис. 8 показано распределение величины  $\Psi(\eta)$  для  $s/R_N = 10,4$ , характеризующей тепловую асимметрию, при различных скоростях вращения  $\omega$ . Как следует из рис. 8а (УП), с ростом скорости вращения увеличивается величина тепловой асимметрии  $I(s)$  и одна сторона тела нагревается сильнее, чем другая. Из рис. 8б (графит В-1) видно, что величина тепловой асимметрии так же равна нулю при нулевой скорости вращения, но для ненулевых значений скорости вращения она уменьшается с ростом  $\omega$ . Проведенные расчеты показали, что положение максимума скорости уноса материала, обусловленного термохимическим разрушением поверхности ТЗП, близко к максимуму давления, не зависит от скорости вращения и не следует за максимумом температуры поверхности. Тем не менее, введя величину

$$\Lambda_w = (\rho v)_w(s, \eta) - (\rho v)_w(s, 360^\circ - \eta),$$

получим, что  $\Lambda_w$  (см. рис. 9) аналогично  $\Psi_w$  является положительной функцией при  $\omega > 0$ , что говорит о наличии асимметрии в распределении  $(\rho v)_w(\eta)$ .

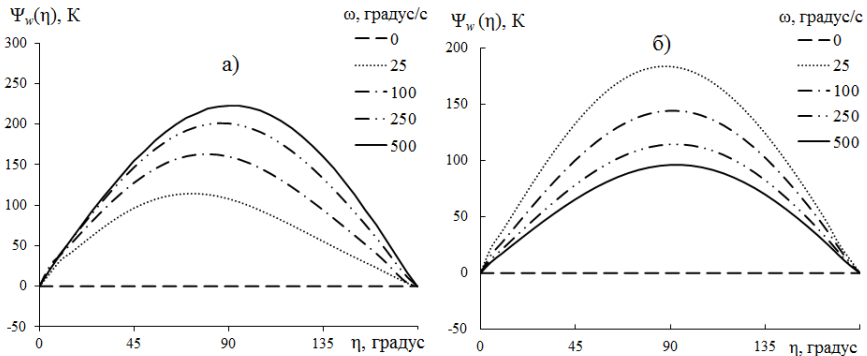


Рис. 8 – Зависимость величины  $\Psi(\eta)$  от окружной координаты в сечении  $s/R_N = 10,04$  для УП (а) и графита В-1 (б).

Из рис. 8, 9 видно, что температура поверхности и скорость уноса материала за счет абляции имеют более высокие значения при  $180^\circ < \eta < 360^\circ$ , чем при  $0^\circ < \eta < 180^\circ$ . Из рис. 10 видно, что величина  $I$ , характеризующая различие в нагреве поверхности правой и левой части тела, зависит немонотонно от скорости вращения.

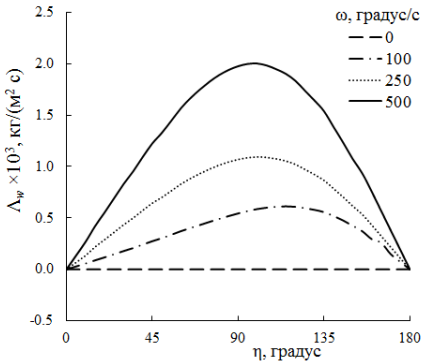


Рис. 9 – Зависимость  $\Lambda_w$  от окружной координаты в сечении  $s/R_N = 10,04$  (графит В-1).

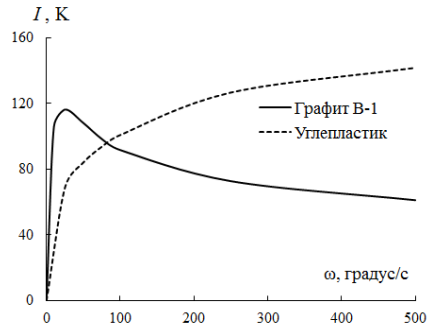


Рис. 10 – Зависимость величины тепловой асимметрии  $I$  от скорости вращения в сечении  $s/R_N = 10,04$ .

Расчеты показывают, что для каждого теплозащитного материала существует значение скорости вращения  $\omega_{\max}$ , при котором величина тепловой асимметрии (28) достигает максимального значения (для графита В-1  $\omega_{\max} \approx 25$  градус/с).

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработан и протестирован комплекс программ сопряженного ТМО для случая гиперзвукового пространственного обтекания вращающегося затупленного тела.

2. Для задачи сверхзвукового осесимметричного обтекания сферически затупленного конуса проанализировано влияние скорости вращения на распределение теплового потока и трения на изотермической поверхности тела. Получена аппроксимационная формула для оценки теплового потока в зависимости от скорости вращения и температуры поверхности.

3. 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. Получено, что при вращении с угловой скоростью 50 градус/с перепад температур на графите В-1 уменьшается с 1004,4 К до 327 К, на УП – с 688 К до 526,9 К.

4. 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  $\omega$ . Показано, что для графита В-1 он больше, чем для УП.

5. Численно определена зависимость величины тепловой асимметрии от скорости вращения. Установлено, что величина тепловой асимметрии зависит от 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 УП. Величина тепловой асимметрии при скоростях вращения до 100 градус/с для графита больше, чем для УП.

6. В результате численного решения сопряженной задачи тепломассообмена при сверхзвуковом пространственном обтекании вращающегося сферически затупленного конуса с учетом термического разложения УП 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 ПС.

7. В рамках двухтемпературной модели численно исследовано тепловое состояние нагреваемых материалов в зависимости от значений пористости и теплопроводности. Показано, что газ-охладитель на поверхности имеет большую температуру, чем материал. Установлено, что увеличение пористости ведет к повышению расхода газа-охладителя, обеспечивая более эффективное снижение температуры. Получено количественное и качественное согласование результатов расчетов с экспериментальными данными.

8. Численно изучено влияние состава ТЗМ на основе УП на характеристики сопряженного ТМО при сверхзвуковом пространственном обтекании сферически затупленного тела с учетом термического разложения ТЗМ. Показано, что УП с меньшей долей смолы и одинаковыми термокинетическими параметрами при кратковременном аэродинамическом нагреве имеют меньшую скорость массового уноса газообразных компонентов, а при длительном нагреве – большую. Установлено, что максимальная разница температур поверхности по сравнению с аналогичными инертными ТЗМ зависит от состава УП и находится в диапазоне от 12,5 до 22,6 К.

9. С использованием двухтемпературной модели численно исследовано влияние малых энергетических воздействий на характеристики тепломассообмена. Установлено, что увеличение интенсивности пульсации до некоторого значения приводит к увеличению расхода газа-охладителя, что, в свою очередь, обеспечивает более низкие температуры. Получено количественное и качественное согласование результатов расчетов с экспериментальными данными.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:*

1. Зинченко В. И. Аэродинамика и сопряженный тепломассобмен затупленных тел при сверхзвуковом обтекании с учетом осложняющих факторов / В. И. Зинченко, В. Д. Гольдин, К. Н. Ефимов, **В. А. Овчинников**,

А. С. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 2178–2180. – 0,35 / 0,07 а.л.

2. Гольдин В. Д. 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. – 0,35 / 0,18 а.л.

3. **Овчинников В. А.** Математическое моделирование процесса теплообмена в теплозащитном материале / В. А. Овчинников, А. С. Якимов // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т. 57, № 6. – С. 150–159. – 1,17 / 0,58 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

**Ovchinnikov V. A.** Mathematical modeling of heat transfer in a heat-shielding material / V. A. Ovchinnikov, A. S. Yakimov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2016. – Vol. 57, № 6. – P. 1093–1100. – DOI: 10.1134/S0021894416060171.

4. **Овчинников В. А.** Расчет характеристик тепломассообмена в многослойном теплозащитном покрытии / В. А. Овчинников, А. С. Якимов // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54, № 6. – С. 550–559. – 0,86 / 0,43 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

**Ovchinnikov V. A.** Calculation of characteristics of heat and mass transfer in a multilayer heat resistant coating / V. A. Ovchinnikov, A. S. Yakimov // High Temperature. – 2016. – Vol. 54, № 6. – P. 851–857. – DOI: 10.1134/S0018151X16060134.

5. Ефимов К. Н. Математическое моделирование влияния вращения на характеристики сопряженного тепломассообмена при высокоэнтальпийном обтекании затупленного по сфере конуса под углом атаки / К. Н. Ефимов, **В. А. Овчинников**, А. С. Якимов // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 5. – С. 677–689. – 1,52 / 0,51 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

Efimov K. N. Mathematical modeling of rotation effects on conjugate heat and mass transfer at a high-enthalpy flow around a spherically blunted cone at incidence / K. N. Efimov, **V. A. Ovchinnikov**, A. S. Yakimov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2017. – Vol. 24, № 5. – P. 657–669. – DOI: 10.1134/S086986431705002X.

6. **Овчинников В. А.** Математическое моделирование влияния шероховатости поверхности и массового уноса на тепловую защиту / В. А. Овчинников, А. С. Якимов // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 5. – С. 782–787. – 0,7 / 0,35 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

**Ovchinnikov V. A.** Mathematical simulation of the influence of surface roughness and mass loss on thermal protection / V. A. Ovchinnikov, A. S. Yakimov // High Temperature. – 2017. – Vol. 55, № 5. – P. 782–787. – DOI: 10.1134/S0018151X17040162.

7. **Овчинников В. А.** Численное исследование процесса теплообмена системы транспирационного охлаждения при влиянии малых энергетических возмущений / В. А. Овчинников, А. С. Якимов // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 5. – С. 1126–1134. – 1,05 / 0,53 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

**Ovchinnikov V. A.** Numerical Investigation of the Process of Heat Transfer of a System of Transpiration Cooling Under the Effect of Small Energy Disturbances / V. A. Ovchinnikov, A. S. Yakimov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90, № 5. – P. 1069–1076. – DOI: 10.1007/s10891-017-1658-y.

8. Efimov K. N. Rotation Influence on Heat Transfer at Supersonic Flow Around a Blunted Body [Electronic resource] / K. N. Efimov, **V. A. Ovchinnikov**, A. S. Yakimov // AIAA Journal. – 2018. – Vol. 56, № 2. – P. 743–751. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/full/10.2514/1.J056282> (access date: 11.01.2018). – DOI: 10.2514/1.J056282 (Published online: 27 October 2017). – 0,95 / 0,32 а.л. (*Web of Science*)

*Статьи в научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus:*

9. Krotov M. K. Mathematical Modeling of Surface Roughness and Ablation Effects on Thermal Protection / M. K. Krotov, **V. A. Ovchinnikov**, A. S. Yakimov // Proceedings of the 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). Tomsk, Russia, December 01–04, 2015. – 2015. – 5 p. – DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414933. – 0,58 / 0,19 а.л.

10. **Ovchinnikov V. A.** Mathematical modeling of the heat exchange process transpiration cooling systems under influence of pulsations of a coolant gas / V. A. Ovchinnikov, A. S. Yakimov // Proceedings of the 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). Tomsk, Russia, December 01–04, 2015. – 2015. – 6 p. – DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414934. – 0,7 / 0,35 а.л.

11. **Ovchinnikov V.** Mathematical modeling of the heat transfer process in porous cooling systems under influence low energy disturbances / V. Ovchinnikov, E. Ruleva, A. Yakimov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 72 : Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC 2016). Tomsk, Russia, April 19–21, 2016. – № 01083. – 10 p. – DOI: 10.1051/mateconf/20167201083. – 0,79 / 0,26 а.л.

12. Goldin V. D. Influence of thermal protection material composition on heat and mass exchange of body in spatial supersonic flow / V. D. Goldin, **V. A. Ovchinnikov**, I. A. Kotov // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 683 : Multifunctional Materials: Development and Application : 12th International Conference on Prospects of Fundamental Sciences Development. Tomsk, Russia, April 21–24, 2015. – P. 142–149. – 1,05 / 0,35 а.л.

*Свидетельства о регистрации электронных программ для ЭВМ:*

13. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016619291. HyperBlunt-1.07. Программа расчета гиперзвукового обтекания сферического затупления летательного аппарата вязким химически

равновесным воздухом / **Овчинников В. А.** (RU); правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2016616702; дата поступления – 23.06.2016; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 17.08.2016. – 1 с.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014661343. AeroCrit-1.01. Расчет химически равновесного гиперзвукового обтекания лобовой критической точки затупленного тела в рамках теории пограничного слоя / **Овчинников В. А.** (RU); правообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2014619531; дата поступления – 23.09.2014; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 29.10.2014. – 1 с.

*Публикации в прочих научных изданиях:*

15. Гольдин В. Д. Турбулентный пограничный слой на вращающихся телах большого удлинения, обтекаемых гиперзвуковым потоком газа / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : доклады II Всероссийской научной конференции.* Томск, 06–08 июня 2000 г. – Томск, 2000. – С. 179–180. – 0,23 / 0,12 а.л.

16. Гольдин В. Д. Программа расчета сопряженного теплообмена в турбулентном пограничном слое при пространственном сверхзвуковом обтекании затупленных тел / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // *Сопряженные задачи механики, информатики и экологии : сборник материалов международной конференции.* Томск, 15–20 сентября 2002 г. – Томск, 2002. – С. 52. – 0,06 / 0,03 а.л.

17. Гольдин В. Д. Влияние сопряженного тепломассообмена на аэродинамические характеристики вращающегося затупленного тела при его пространственном обтекании / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // *Сопряженные задачи механики, информатики и экологии : материалы международной конференции.* Томск, 05–10 июля 2004 г. – Томск, 2004. – С. 56–58. – 0,18 / 0,09 а.л.

18. Зинченко В. И. Влияние состава теплозащитного материала на характеристики сопряженного тепломассообмена при сверхзвуковом пространственном обтекании затупленного тела / В. И. Зинченко, В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // *Вестник Томского государственного университета. Бюллетень оперативной научной информации.* – 2006. – № 109. – С. 91–100. – 0,58 / 0,19 а.л.

19. Гольдин В. Д. Влияние вращения на распределение трения и теплового потока при обтекании тела со сверхзвуковой скоростью при наличии вдува газа с поверхности / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // *Вестник Томского государственного университета. Бюллетень оперативной научной информации.* – 2006. – № 109. – С. 69–78. – 0,58 / 0,29 а.л.



20. Зинченко В. И. Исследование характеристик сопряженного тепломассообмена при обтекании вращающегося тела сверхзвуковым потоком газа с учетом пиролиза теплозащитного покрытия / В. И. Зинченко, В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // Вестник Томского государственного университета. Бюллетень оперативной научной информации. – 2006. – № 109. – С. 79–90. – 0,7 / 0,23 а.л.

21. Гольдин В. Д. Влияние вращения на характеристики тепломассообмена затупленного тела в сверхзвуковом потоке / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : материалы V Всероссийской научной конференции. Томск, 03–05 октября 2006 г. – Томск, 2006. – С. 489–490. – 0,23 / 0,12 а.л.

22. Гольдин В. Д. Пограничный слой на поверхности вращающегося затупленного тела, обтекаемого под углом атаки / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : материалы V Всероссийской научной конференции. Томск, 03–05 октября 2006 г. – Томск, 2006. – С. 491–492. – 0,23 / 0,12 а.л.

23. Гольдин В. Д. Сопряженный тепломассообмен при пространственном сверхзвуковом обтекании вращающегося затупленного тела / В. Д. Гольдин, В. И. Зинченко, **В. А. Овчинников** // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : материалы международной конференции. Томск, 25–28 июня 2007 г. – Томск, 2007. – С. 40–41. – 0,12 / 0,04 а.л.

24. Гольдин В. Д. Расчет излучения от двухфазной струи реактивного двигателя / В. Д. Гольдин, В. Г. Зверев, **В. А. Овчинников** // Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 135-летию Томского государственного университета и 65-летию механико-математического факультета : тезисы докладов. Томск, 02–04 октября 2013 г. – Томск, 2013. – С. 200. – 0,06 / 0,02 а.л.

25. Гольдин В. Д. Влияние сопряженного тепломассообмена на аэродинамические характеристики вращающегося затупленного тела при обтекании сверхзвуковым потоком газа под углом атаки / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников** // Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 135-летию Томского государственного университета и 65-летию механико-математического факультета: тезисы докладов. Томск, 02–04 октября 2013 г. – Томск, 2013. – С. 201. – 0,06 / 0,03 а.л.

26. Котов И. А. Влияние состава теплозащитного материала на тепломассообмен тела при сверхзвуковом пространственном обтекании / И. А. Котов, **В. А. Овчинников** // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых. Томск, 21–24 апреля 2015 г. – 2015. – С. 591–593. – 0,35 / 0,18 а.л.

27. Ефимов К. Н. Численное исследование характеристик сопряженного тепломассообмена при гиперзвуковом пространственном обтекании вращающегося сферически затупленного тела и вдуве газа с поверхности /

К. Н. Ефимов, **В. А. Овчинников**, А. С. Якимов // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену : тезисы докладов и сообщений. Минск, 23–26 мая 2016 г. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 84–88. – 0,58 / 0,19 а.л.

28. **Овчинников В. А.** Моделирование процесса теплообмена систем пористого охлаждения при влиянии пульсаций газа-охладителя / В. А. Овчинников, А. С. Якимов // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов и сообщений. Минск, Республика Беларусь, 23–26 мая 2016 г. – Минск, 2016. – Т. 1. – С. 161–165. – 0,58 / 0,29 а.л.

29. Гольдин В. Д. Программа расчёта сопряженного теплообмена затупленного тела при его спуске в атмосфере с переменным углом атаки / В. Д. Гольдин, **В. А. Овчинников**, К. Н. Ефимов // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики : сборник трудов IX Всероссийской научной конференции, посвященной 55-летию полета Ю. А. Гагарина. Томск, 21–25 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 380–382. – 0,35 / 0,12 а.л.

30. Ефимов К. Н. Моделирование влияния вращения затупленного тела на характеристики сопряженного тепломассообмена при движении со сверхзвуковой скоростью / К. Н. Ефимов, **В. А. Овчинников**, А. С. Якимов // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : материалы XX Всероссийской научной конференции с международным участием. Томск, 21–23 сентября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 86–88. – 0,35 / 0,12 а.л.

31. Гаар С. А. Исследование характеристик тепломассообмена при радиационно-конвективном нагреве затупленного тела с использованием комбинированной тепловой защиты / С. А. Гаар, А. С. Якимов, К. Н. Ефимов, **В. А. Овчинников** // Все грани математики и механики : сборник тезисов докладов всероссийской молодежной научной конференции. Томск, 25–28 апреля 2017 г. – Томск, 2017. – С. 44. – 0,06 / 0,01 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.  
Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательского Дома Томского государственного университета  
Заказ № 1908-18 от «16» октября 2018 г. Тираж 100 экз.  
г. Томск Московский тр.8 тел. 53-15-28