

На правах рукописи



Буляккулов Марсель Маратович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО
ПОТОКА С ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ ЛА**

Специальность

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Никитин Петр Васильевич

Официальные оппоненты: **Тимошенко Валерий Павлович**
доктор технических наук, ОАО "Научно-производственное объединение "МОЛНИЯ",
начальник центра наземных испытаний и экспериментальных исследований

Губанов Евгений Игоревич
кандидат технических наук, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», начальник сектора

Ведущая организация: Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

Защита состоится «22» декабря 2017 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) <https://mai.ru/upload/iblock/94e/Dissertatsiya-Bulyakkulov.pdf>

Автореферат разослан: «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В связи с не прекращаемым развитием и совершенствованием техники постоянно повышаются и требования к самим изделиям, их функциональным возможностям и условиям, в которых они эксплуатируются. Данный факт проявляется в непрерывном увеличении скорости, температуры, агрессивности рабочих сред, чрезмерных механических нагрузок. Поэтому, в настоящее время, задачи взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с различными конструкциями вошли в разряд проблемных задач машиностроения. К таким задачам относятся:

- борьба с механической эрозией поверхности элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) при обтекании гетерогенными потоками;

- совершенствование технологии механической обработки поверхностей конструкции с использованием высокоскоростных гетерогенных потоков в качестве технологического инструмента;

- дальнейшее развитие технологий формирования разнофункциональных покрытий на поверхностях конструкций с использованием газодинамических методов (высокоскоростных гетерогенных потоков).

Высокоскоростные гетерогенные потоки с дисперсными примесями в виде капель жидкости или твёрдых частиц широко распространены и являются одним из вредных факторов при эксплуатации техники. Эти факторы реализуются, например, при полёте высокоскоростных ЛА в гетерогенной атмосфере, при взаимодействии конструкции ЛА со струями РДТТ, в газогенераторах, газовых и паровых турбинах, в технологии абразивной обработки деталей и т.д. Особенно остро эта задача стоит в авиационной и ракетно-космической технике.

Сложность решения такой задачи заключается в том, что она относится к разряду комплексных, многопараметрических задач. В ней тесно сопряжены задачи термо-газодинамики и тепло-массообмена гетерогенной неизотермической среды, а также механического взаимодействия с обменом импульса дискретной фазы, сопровождающегося процессом эрозии поверхности обтекаемого тела.

Обтекание тел гетерогенным потоком осуществляется двумя фазами, газообразной (газ-носитель) и твёрдой (частицы разной дисперсности, «К-фаза»). При высоких скоростях набегающего газового потока содержание в нём даже малой концентрации частиц резко изменяет картину обтекания и вызывает существенное дополнительное разрушение элементов конструкции летательного аппарата. Наряду с термохимическим и силовым воздействием на обтекаемое тело газовой составляющей набегающего потока, происходит термоэрозионное, механическое воздействие со стороны «К-фазы». Перечисленные процессы видоизменяют механизмы термо-газодинамики и энерго-массообмена, а также оказывают влияние непосредственно на ресурс работы конструкции. Также на режимы течения и обтекания оказывает влияние процесс обмена импульсом и энергией между газом-носителем и «К-фазой» при их движении в гетерогенном потоке, так как при этом может происходить изменение геометрических характеристик (размера, формы) частиц «К-фазы» в результате физико-химических превращений.

В этом плане остро стоит задача исследования процессов обтекания и взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью конструкций разных объектов техники.

Цель работы

Данная работа посвящена исследованию процесса взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с элементами конструкции летательного аппарата.

Задачи работы

Для достижения указанной цели в работе решены следующие задачи:

- критический анализ существующих способов моделирования процессов взаимодействия гетерогенного потока с преградой, методов и средств диагностики параметров высокоскоростных гетерогенных потоков;
- разработка математической модели и численное моделирование процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции летательного аппарата;
- исследование механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов;
- по результатам исследования получение соотношений для расчёта параметров эрозионного разрушения конструкционных материалов.

Методы исследования, используемые в работе, направлены на решение поставленных задач и достижения указанной цели.

На основе имеющегося опыта исследований взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с преградами, проведенного различными авторами, и с помощью существующих средств численного моделирования предложена математическая модель процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком ЛА конической формы, притупленного сферой, и расчетная схема для ее решения с использованием CFD комплекса ANSYS CFX.

С использованием предложенного метода разделения тепловой и эрозионной составляющих термоэрозионного уноса конструкционных материалов и принципа сопоставления эрозионной стойкости и температуропроводности выявлено два класса конструкционных материалов (металлические и композиционные ТЗМ) с принципиально разными механизмами их разрушения при воздействии высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками.

В последующих разделах работы приведено решение всех вышеперечисленных задач.

Научная новизна

Научная новизна работы выражается в том, что:

- предложена математическая модель процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции ЛА конической формы, притупленного сферой. С использованием предложенной модели проведено численное моделирование процесса обтекания гетерогенным потоком поверхности конструкции высокоскоростного ЛА;
- рассчитаны зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов;
- проведена оценка интенсивности эрозионного разрушения материалов;
- получены соотношения для расчёта процесса разрушения высокоскоростным гетерогенным потоком.

Теоретическая и практическая значимость приведенных результатов исследований

Теоретическая ценность работы заключается в том, что составлена математическая модель взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов. Предложен метод её численного решения при заданных граничных условиях.

Практическая значимость работы состоит в том, что получены соотношения для расчёта параметров эрозионного разрушения ряда конструкционных материалов, которые могут быть использованы при проектировании высокоскоростных ЛА. Получены характеристики эрозионного разрушения некоторых конструкционных материалов.

Достоверность и обоснованность

Достоверность и обоснованность работы подтверждаются удовлетворительным совпадением результатов численного решения с использованием предложенной математической модели, с данными стендовых экспериментов, и с тестовыми расчётными данными других авторов, полученными при прочих равных начальных условиях.

Личный вклад соискателя:

- исследование механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью ряда конструкционных материалов;
- разработка математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;
- с использованием предложенной математической модели проведение численного моделирования процесса обтекания гетерогенным потоком поверхности конструкции высокоскоростного летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;
- получены зависимости для оценки эрозионного разрушения конструкционных и теплозащитных материалов при воздействии высокоскоростных высокотемпературных потоков.

Апробация работы и публикации

Основные научные результаты работы неоднократно докладывались на научно-технических отечественных и международных конференциях. В частности:

- на II-ой Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем» (Москва, Россия, 21-22 ноября 2013г.);
- на «16-ой Научно-технической конференции по аэродинамике» (п. Володарского, Россия, 26-27 февраля 2015г.);
- на 14-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика — 2015» (Москва, Россия, 16-20 ноября 2015г.);
- на Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (Москва, Россия, 24-27 ноября 2015г.);
- на «11-ой Международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях» (г. «Алушта», Россия, 25 - 31 мая 2016г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в двух научных статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 2 - в научных рецензируемых изданиях.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по работе и списка литературы; содержит 155 страниц, 70 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 76 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы. Изложены предмет и новизна темы исследования, а также, степень разработанности проблемы. Кратко охарактеризованы методы исследования. Показана теоретическая и практическая значимость работы. Описана структура и объём работы, указаны публикации по теме исследования.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ использования гетерогенных потоков в транспортном и энергетическом машиностроении с

целью сопоставления энергетических режимов и основных параметров применяемых в промышленности гетерогенных потоков.

Рассмотрены методы и средства, которые позволяют моделировать процессы взаимодействия гетерогенных потоков с заданными параметрами с твёрдой стенкой.

Описана газодинамика гетерогенных потоков, отмечена необходимость выполнения допущений в виде модели взаимопроникающих континуумов, отражены границы её применимости.

Определены основные силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу. Отмечены особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего газового потока, которые заложены в коэффициенте аэродинамического сопротивления C_D . Проанализированы зависимости для вычисления значений коэффициента сопротивления C_D для частиц сферической формы разной дисперсности.

Во второй главе описаны методы и средства диагностики параметров, используемые при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой, такие как:

1. Лазерная доплеровская анемометрия, позволяющая регистрировать один из основных параметров гетерогенных потоков - скоростное скольжение фаз $V - V_p$.

2. Калориметрические датчики, используемые для определения плотности теплового потока. Подробно проанализированы принципы работы и оценка погрешности калориметров «стержневого» и «таблеточного» типов. Это позволило исследовать баланс энергии частиц гетерогенного потока при взаимодействии со стенкой конструкции и рассчитать температуру поверхности в процессе эрозии.

3. Контактные и бесконтактные методы и средства определения температуры поверхности преграды, взаимодействующей с гетерогенным потоком.

4. Проведен критический анализ использованных в работе методов и средств диагностики, оценены погрешности определения параметров.

В третьей главе с использованием математического моделирования проведено решение численным методом задачи взаимодействия «К-фазы» с элементами конструкции ЛА при обтекании высокоскоростного

неизотермического гетерогенного потока головной части ЛА конической формы, притупленной сферой.

Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные.

Параметр	Характеристика
Форма летательного аппарата	Конус, притупленный сферой
Геометрические размеры летательного аппарата	– радиус сферического притупления: $R_N=0,5$ м – длина конической части по образующей: $L_{кон.}=2$ м – угол конусности: $\gamma=30^\circ$
Угол атаки при полёте	$\alpha=0^\circ$
Материал частиц «К-фазы»	SiO_2
Дисперсность твердой фазы	от 1 до 30 мкм
Массовая концентрация твердой фазы в гетерогенном потоке	до 10 %
Высота полёта	$H=20$ км
Скорость полёта (число Маха)	$M_\infty \leq 6$

Решение задачи проведено с использованием разработанной математической модели для газовой фазы и «К-фазы».

Известно, что произвольное движение сплошной среды описывается уравнениями Навье-Стокса. Поскольку в настоящее время отсутствует точное разрешение общей системы уравнений Навье-Стокса, то задачи газовой динамики решаются методами приближенного решения этих уравнений. Как правило, в качестве инструмента используются разработанные численные методы решения, в которых применяется достаточно гибкий математический аппарат.

В данной работе при построении математической модели учитывались «возможности» и функционал CFD (computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика) комплекса ANSYS CFX.

Предложенная в работе математическая модель представляет систему четырёх независимых уравнений в виде:

1. Систему уравнений Навье-Стокса в векторной форме:

– уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \Delta \cdot (\rho \vec{V}) = 0. \quad (1)$$

– уравнения количества движения (сохранения импульса)

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\rho\vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla\rho + \nabla \cdot \vec{\tau} + S_M, \quad (2)$$

где $\vec{\tau}$ – тензор напряжений:

$$\vec{\tau} = \mu \left[\nabla\vec{V} + (\nabla\vec{V})^T - \frac{2}{3}\partial\nabla \cdot \vec{V} \right]. \quad (3)$$

В свою очередь, δ – дельта-функция Кронекера

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2. Уравнение энергии (сохранения энергии):

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial\tau} - \frac{\partial\rho}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}h_0) = \nabla \cdot (\lambda\nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V}\vec{\tau}) + \vec{V}S_E + S_M, \quad (5)$$

где h_0 – энтальпия торможения газовой фазы:

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}, \quad (6)$$

h – статическая (термодинамическая) энтальпия:

$$h = C_p(p, T) \cdot \Delta T \quad (7)$$

3. Уравнение состояния для каждого i -го компонента газовой фазы

$$p_i = \frac{\rho_i}{M_i} R_i T. \quad (8)$$

В соотношениях (1)÷(8) использованы следующие обозначения: p – статическое давление газовой фазы, ρ – плотность газовой фазы, V – скорость газовой фазы, T – статическая температура газовой фазы, τ – время, S_M – источник член для импульса, S_E – источник член для энергии, μ – коэффициент динамической вязкости газовой фазы, λ – коэффициент теплопроводности газовой фазы, ∇ – оператор Гамильтона (набла), знак (\rightarrow) – обозначает векторную величину.

В настоящее время при математическом моделировании процесса обтекания тел гетерогенными потоками используют в основном два метода:

- метода Эйлера (метод Эйлер-Эйлер), описывающий как течение несущей газовой, так и дисперсной фаз. В данном методе гетерогенная система

в целом рассматривается как сплошная среда, к которой применяется модель взаимопроникающих континуумов;

- метод Эйлера-Лагранжа. В этом методе течение несущей фазы описывается методом Эйлера, а дисперсной фазы - методом Лагранжа. Данный подход с достаточной точностью описывает столкновения как между частицами, так и частиц с поверхностью.

В настоящей работе для решения задачи использован метод Эйлера-Лагранжа. В результате для «К-фазы» по методу Лагранжа рассчитывались траектории и характеристики индивидуальных частиц разной дисперсности в определенные промежутки времени. Например, ускорение частицы гетерогенного потока вычислялось с использованием уравнения переноса количества движения в виде:

$$m_p \frac{dU_p}{d\tau} = F_D, \quad (9)$$

где m_p – масса частицы, U_p – скорость частицы, F_D – сила аэродинамического сопротивления межфазного взаимодействия, возникающая из-за разности скоростей газовой и твердой фаз. В свою очередь, F_D представляется формулой:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_p |U_F - U_p| (U_F - U_p), \quad (10)$$

где C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, ρ_F – плотность газовой фазы, A_p – площадь миделевого сечения частицы, U_F – скорость газовой фазы.

Если набегающий гетерогенный поток является неизотермическим, а в сжатом и пограничном слоях газовая фаза химически неактивная, то конвективный теплообмен между газом-носителем и поверхностью частицы рассчитывается с использованием соотношения:

$$Q_{кон,p} = \pi \cdot d_p \cdot \lambda_{газ} \cdot Nu_{w,d} (T_{газ} - T_p), \quad (11)$$

где $\lambda_{w,газ}$ – коэффициент теплопроводности газа при температуре поверхности частицы, $T_{газ}$ – температура газа-носителя, $T_{w,p}$ – температура поверхности частицы, $Nu_{w,d}$ – критерий Нуссельта. Индексы «w» и «p» означают, что для

критерия $Nu_{w,d}$ определяющей является температура частицы $T_{w,p}$, а характерным размером – диаметр частицы.

Из теории конвективного теплообмена известно, что при обтекании сферы ламинарным потоком газа, процесс теплообмена рассчитывается с использованием критериального алгебраического соотношения вида:

$$Nu_{w,d} = 2 + 0.6Re_{w,d}^{0.5} \cdot Pr_w^{1/3} \quad (12)$$

где $Nu_{w,d} = \rho_w \cdot v_{газ} \cdot d_p / \mu_w$, $Pr_w = \frac{\mu_{газ} \cdot C_{p,газ}}{\lambda_{газ}}$. В свою очередь, $C_{p,газ}$ – удельная теплоёмкость газовой фазы при температуре стенки; $\lambda_{газ}$ – коэффициент теплопроводности газовой фазы при температуре стенки; $\mu_{газ}$ – коэффициент динамической вязкости газовой фазы при температуре стенки.

Далее, зная $Q_{кон,p}$, просто определить температуру частицы в момент взаимодействия с поверхностью конструкции. С этой целью используется соотношение:

$$Q_{кон,p} = c_p \cdot m_p \cdot (T_{p,кон} - T_{нач}) \quad (13)$$

На основе представленных выше моделей в работе предложена расчётная схема для решения задачи.

Предложенная расчётной схема строится на форме геометрической модели.

Геометрическая модель в поставленной задаче представляет собой расчётную область с вырезанным из неё летательным аппаратом. На базе геометрической модели в программном пакете ANSYS ICEM CFD разработана сеточная модель на основе структурированной гексаэдрической сетки (рис. 1). Для лучшего разрешения пристеночного пограничного слоя на поверхности ЛА применено сгущение сетки (рисунок 2).

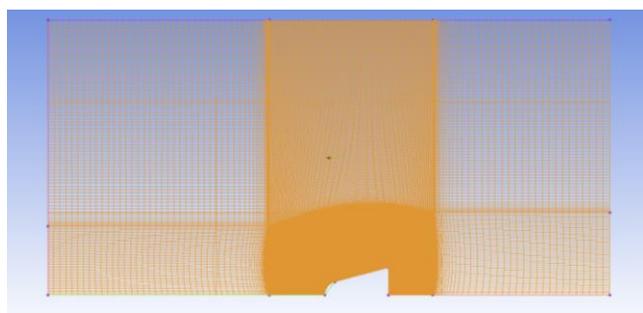


Рисунок 1. Разработанная для расчёта сеточная модель

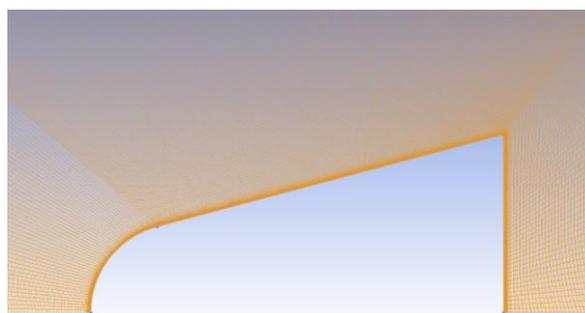


Рисунок 2. Структурированная гексаэдрическая сетка со сгущением ячеек по поверхности ЛА

На следующем этапе задавались условия однозначности, то есть параметры, определяющие свойства домена: модель газа, модель турбулентности и граничные условия.

Модель газа: род газа – воздух; начальные условия: $T_{нач}=216.66\text{ K}$, $P_{нач}=5526\text{ Па}$; $V_{нач}=50\text{ м/с}$.

В качестве граничных условий (рисунок 3) на «входе» расчётной области задавались: скорость потока $V=1800\text{ м/с}$ ($M \approx 6$), статическая температура и давление газа – $T_{газ}=216,66\text{ K}$ и $P_{газ}=5526\text{ Па}$. Массовая концентрация «К-фазы» в гетерогенном потоке составляла 10% от массовой концентрации газовой фазы. Кроме того, задавался закон распределения дисперсности частиц в площади входного сечения.

На остальных границах расчётной области задавались следующие условия:

- на поверхности - условие типа «стенка»;
- учитывалась симметрия тела;
- сверхзвуковой выход и свободный выход при параметрах атмосферы на высоте полёта ЛА: $H = 20\text{ км}$: $T_H=216.66\text{ K}$, $P_H=5526\text{ Па}$.

Необходимо отметить, что значение скорости набегающего потока на границе «вход» повышалось постепенно до максимальной величины, $M=6$.

Род материала «К-фазы» - SiO_2 (диоксид кремния).

По форме все частицы в каждом вычислительном эксперименте считались однородными шарами с диаметрами от 1 до 30 мкм. Взаимодействие твердой фазы с поверхностью ЛА считалось абсолютно упругим.

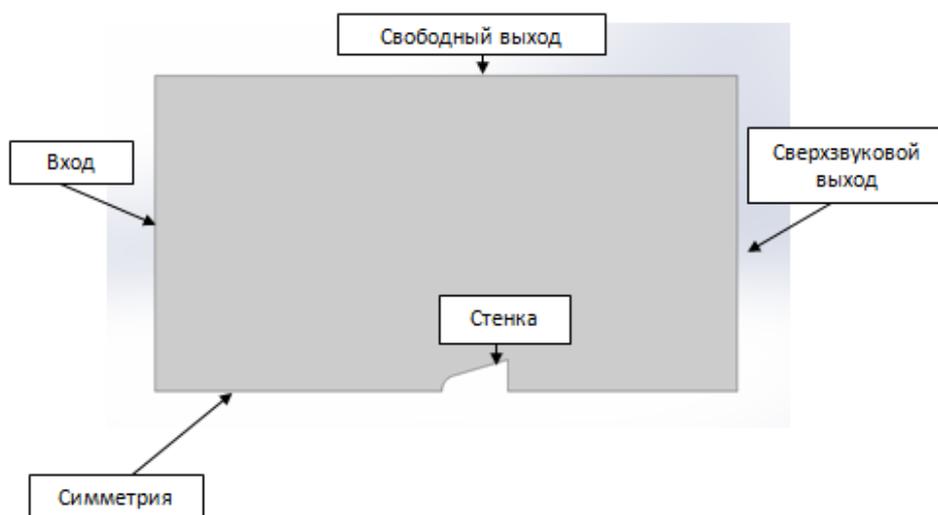
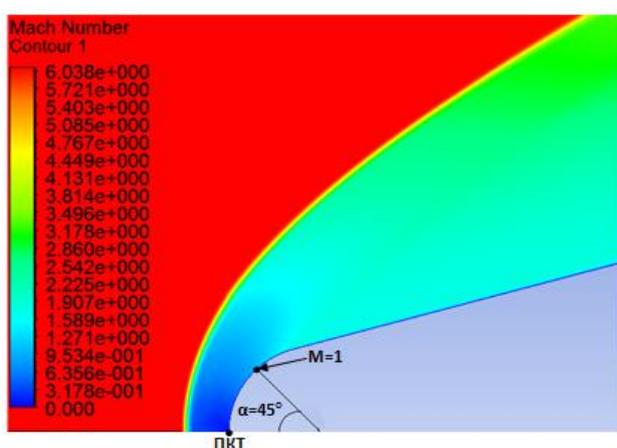


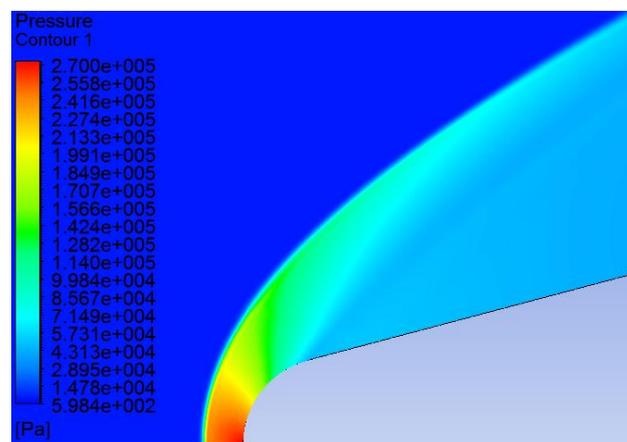
Рисунок 3. Граничные условия.

В работе первый этап математического моделирования выразался в проведении расчётов математической модели, описывающей процесс обтекания высокоскоростным гомогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. Параметры набегающего гомогенного потока приведены в постановке задачи.

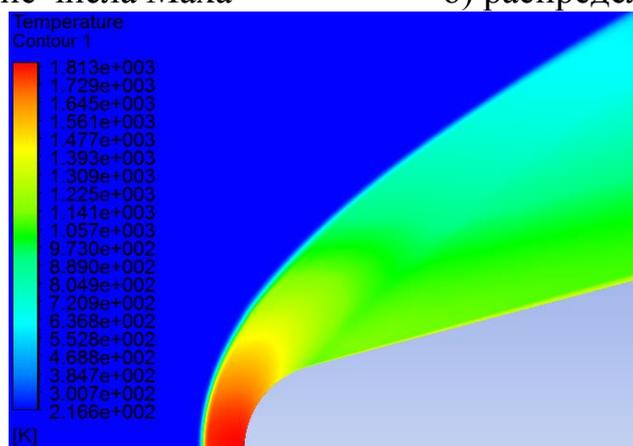
Расчётные параметры, полученные в результате численного расчёта математической модели представлены на рисунках 4 а), б), с). Из анализа полученных данных следует, что предложенная математическая модель адекватна построенной расчётной модели. Заданные условия однозначности соответствуют параметрам поставленной задачи и параметрам набегающего гомогенного потока вблизи поверхности ЛА.



а) распределение числа Маха



б) распределение давления



с) распределение температуры

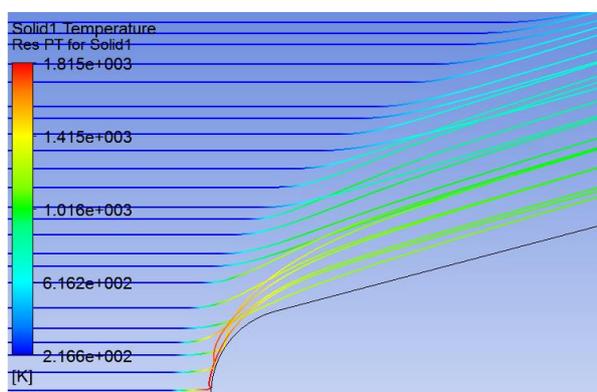
Рисунок 4. Визуализация результатов численного моделирования

Из представленных результатов видно, что число Маха изменяется по поверхности сферы от $M=0$ (в передней критической точке - ПКТ) до $M=1$ (звуковая линия – $\alpha=45^\circ$) (рисунок 4а). Параметры торможения в ПКТ (рисунок

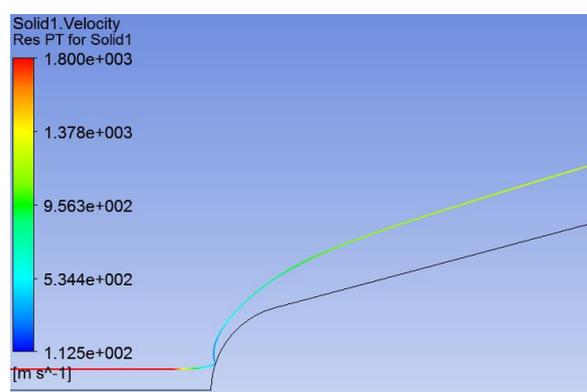
4б и 4в): давление торможения – $P_0 = 2,645 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура торможения – $T_0 = 1781 \text{ К}$.

На базе разработанной расчётной схемы проведена серия вычислительных экспериментов. Для оценки влияния размеров «К-фазы» на физическую картину протекания исследуемого процесса численное моделирование проводилось для разной дисперсности частиц: первая группа – частицы дисперсностью $d_p = 1 \div 10 \text{ мкм}$; вторая группа – частицы дисперсностью $d_p = 11 \div 20 \text{ мкм}$; третья группа – частицы дисперсностью $d_p = 21 \div 30 \text{ мкм}$.

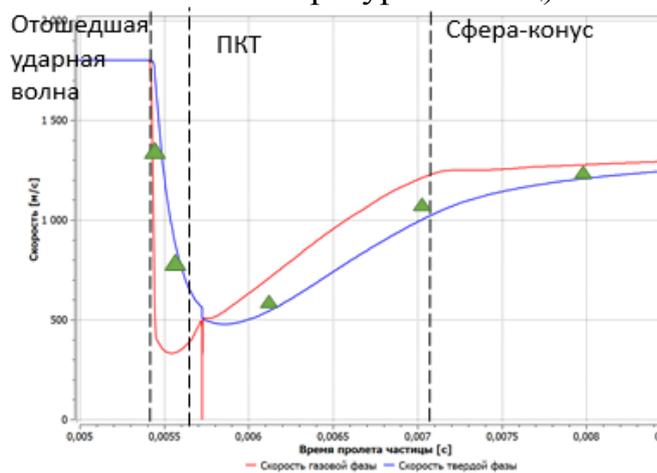
Примеры результатов численных экспериментов представлены на рисунках 5 а), б), в), г).



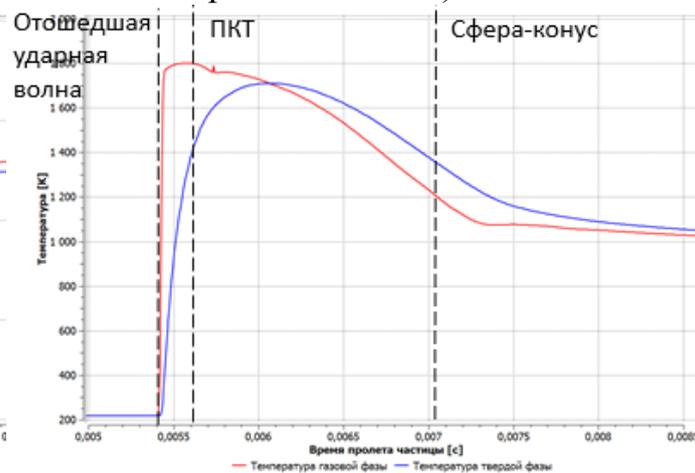
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА (заливка цветом по значениям температуры частиц)



б) Траектория частицы $d = 15,8 \text{ мкм}$ (заливка цветом по значению скорости частицы)



в) Скорость газовой и твердой фазы (частица $d = 15,8 \text{ мкм}$)



г) Температура газовой и твердой фазы (частица $d = 15,8 \text{ мкм}$)

Рис. 5. Результаты численного эксперимента для размеров частиц $d = 11\text{-}20 \text{ мкм}$

Анализ полученных данных показал, что:

- при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед КЛА, как и в случае адекватного обтекания гомогенным гиперзвуковым потоком, образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой;

- параметры твёрдой фазы изменяются аналогично параметрам несущей фазы, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно;

- скорость изменения параметров «К-фазы» прямо пропорциональна диаметру частицы.

Кроме того, выявлена некоторая особенность программного комплекса ANSYS CFX, выражающаяся в следующем. Для переменных, обозначающих параметры «К-фазы», в программном комплексе Ansys CFX нет значений в формате «Hybrid», а есть только в формате «Conservative», поэтому на графических иллюстрациях в моменты времени, соответствующие соударению частицы и поверхности КЛА, скорость «К-фазы» не равна нулю.

В четвертой главе проведён анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды.

В рамках данного анализа рассмотрено уравнение баланса энергии в момент удара частицы о твёрдую поверхность в виде:

$$E_{кин.р} = E_{деф.р} + E_{деф.пр} + E_{наг.р} + E_{наг.пр} + E_{эр.пр}, \quad (14)$$

где $E_{кин.р}$ – кинетическая энергия частицы, $E_{деф.р}$ и $E_{деф.пр}$ – энергии деформации частицы и преграды, $E_{наг.р}$ и $E_{наг.пр}$ – энергия нагрева частицы и преграды, $E_{эр.пр}$ – энергия, затраченная на механическую эрозию преграды.

Проанализирована каждая составляющая выражения (14). В результате получен следующий вид уравнения баланса энергии в момент удара частицы о преграду:

$$\begin{aligned} \frac{m_p \times V_p^2}{2} = \Delta F_p \cdot \sigma_T (d_p - b_p) + 2\pi h_{сег.}^2 \cdot d_p \cdot H_\beta + \\ + m_{\tau,p} \cdot c_p (\bar{T}_{\tau,p} - T_{нач.р}) + m_{\tau,пр} \cdot c_{пр} (\bar{T}_{\tau,пр} - T_{нач.пр}) + E_{эр.пр}. \end{aligned} \quad (15)$$

где m_p – масса частицы, V_p – скорость частицы, ΔF_p – изменение площади боковой поверхности частицы за счет деформации, σ_T – предел текучести материала частицы, b_p – высота частицы после деформации, $h_{сегм}$ – глубина проникновения частицы, d_p – диаметр частицы, H_β – твердость материала преграды, $m_{\tau,p}$, $m_{\tau,пр}$ – доли прогретых масс частицы и преграды за время удара $\tau_{уд}$, $\bar{T}_{\tau,p}$, $\bar{T}_{\tau,пр}$ – среднемассовые температуры прогретых участков частицы и

преграды, $\bar{T}_{нач, p}$, $\bar{T}_{нач, np}$ – температуры частицы и преграды до удара, c_n , c_{np} – удельные теплоемкости материала частицы и преграды при температурах $\bar{T}_{\tau, p}$ и $\bar{T}_{\tau, np}$, соответственно.

Для определения величины энергии, затраченной на эрозию преграды ($E_{эp,np}$), вводится понятие энтальпии эрозии ($I_{эp}$) материала преграды:

$$I_{er} = \bar{C}_p (T_{w,er} - T_{нач}) + \Delta Q_{\phi.n} + Q_{er}, \quad (16)$$

где \bar{C}_p – средняя удельная теплоемкость материала преграды, $\Delta Q_{\phi.n}$ – удельная теплота фазовых переходов (Дж/кг), Q_{er} – удельная энергия, затраченная на механическое разрушение материала преграды при ударе частиц гетерогенного потока (Дж/кг). В случае, когда при ударе частицы фазовые переходы отсутствуют ($\Delta Q_{\phi.n} = 0$), соотношение (16) упрощается.

На данный момент для большинства материалов остаются неизвестными значения их энтальпий разрушения, поэтому не всегда есть возможность использовать формулу (16). Изменение значений I_{er} для некоторых конструкционных материалов представлено в последующих разделах данной главы.

Для расчёта безразмерной скорости эрозионного уноса массы графита и углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) на основании проведенного анализа экспериментальных данных рекомендовано эмпирическое соотношение:

$$\bar{G} = k_1 \left(\frac{V_p}{10^4} \right)^a \left(\frac{T_w}{530} \right)^b \left[1 + \frac{k_2}{k_1 m_p \left(\frac{V_p}{10^4} \right)^a \left(\frac{T_w}{530} \right)^b \sin \alpha^d} \right]^c \sin \alpha^d \quad (17)$$

Значения коэффициентов и степеней, используемые в данной формуле для расчёта величины эрозионного разрушения некоторых материалов, приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Наименование материала	Значения коэффициентов и степеней в уравнении (16)					
	k_1	k_2	a	b	c	d
Графит	28,0	0	2,00	0,2	0	1,25
Углерод-углерод	10,1	$9,25 \cdot 10^{-4}$	1,82	0,2	0,33	1,25

В данной главе также проведен критический анализ механизма эрозии нагретых конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком. На основе обобщения экспериментальных данных предложена общая схема развития физического механизма эрозионного разрушения материалов. Данная схема базируется на зависимости интенсивности эрозионного разрушения материалов m_{er} от интенсивности воздействия на поверхность образца удельной массы падающих частиц m_p (рисунок 7). Из представленных на рисунке 7 данных следует, что общий механизм эрозионного разрушения материалов (металлов) можно разделить на 2 стадии. Для анализа каждой из стадий введём безразмерный параметр (критерий) в виде $\bar{G} = dm_{er} / dm_p$.

Качественная зависимость изменение безразмерной скорости эрозии материала \bar{G} от удельной массы частиц m_p набегающего гетерогенного потока представлена на рисунке 8.

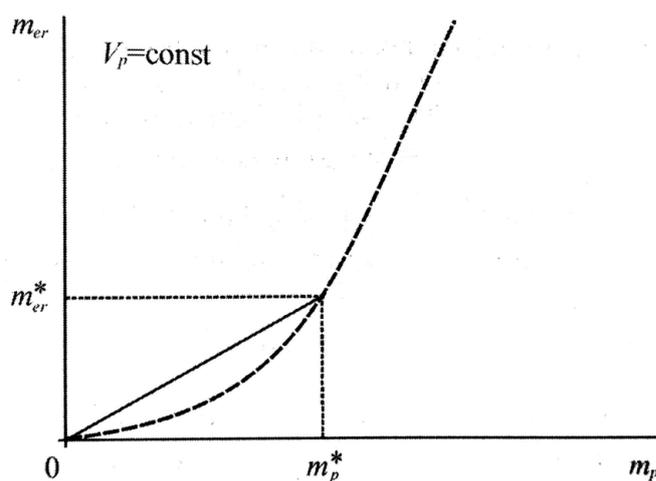


Рисунок 7. Общая схема развития физического механизма эрозионного разрушения материалов, при воздействии частицами с постоянной скоростью

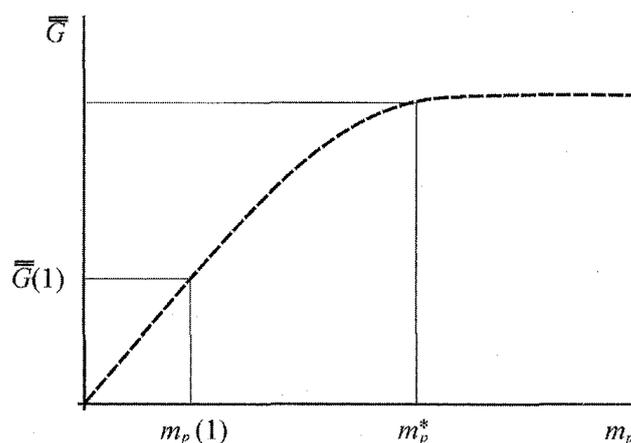


Рисунок 8. Качественная зависимость безразмерной скорости \bar{G} эрозионного разрушения материалов от интенсивности воздействия на поверхность удельной массы частиц m_p набегающего гетерогенного потока

Из представленной схемы общего механизма эрозионного разрушения материалов (металлов), следует:

- на первой стадии разрушения материалов безразмерная скорость эрозионного разрушения \bar{G} нелинейно возрастает с увеличением интенсивности воздействия частиц гетерогенного потока m_p , ($\text{кг}/\text{м}^2$);

- по завершении первой стадии развивается вторая стадия эрозионного разрушения. На этом режиме разрушения $\bar{G} = \text{const}$, ($\bar{G} = dm_{er} / dm_p \approx m_{er} / m_p = \text{const}$), то есть наступает стационарная стадия механизма эрозионного разрушения материалов.

В результате проведенных исследований для каждого рода конструкционных материалов установлены пороговые значения скорости частиц и их температуры, при достижении которых реализуется резкое увеличение интенсивности эрозионного разрушения материалов. Для оценки пороговых значений скоростей частиц и их температуры поверхности рекомендованы соотношения в виде:

$$V_{cr} = 0.2 \sqrt{I_{er} \frac{\rho_{np}}{\rho_p}}, \quad (18)$$

где ρ_{np} и ρ_p – плотности материалов преграды и частиц, соответственно;

$$T_w^* \approx 0.5 T_{nl} \quad (19)$$

где T_{nl} – температура плавления материала преграды.

Погрешности определения скорости и температуры частиц с использованием соотношения (18) и (19) не превышают 10%.

По результатам экспериментальных исследований рекомендовано соотношение для оценки безразмерной скорости эрозионного разрушения материалов в виде:

$$\bar{G} = \eta \cdot \frac{V_p^2}{2} / 2I_{er} \quad (20)$$

где η — коэффициент, характеризующий долю кинетической энергии частицы, перешедшей в энергию разрушения материала преграды.

Используя соотношение (20) и результаты экспериментальных исследований, рассчитаны зависимости эффективной энтальпии эрозионного

разрушения некоторых теплозащитных материалов, как функции температуры поверхности. Расчётные данные представлены на рисунке 9.

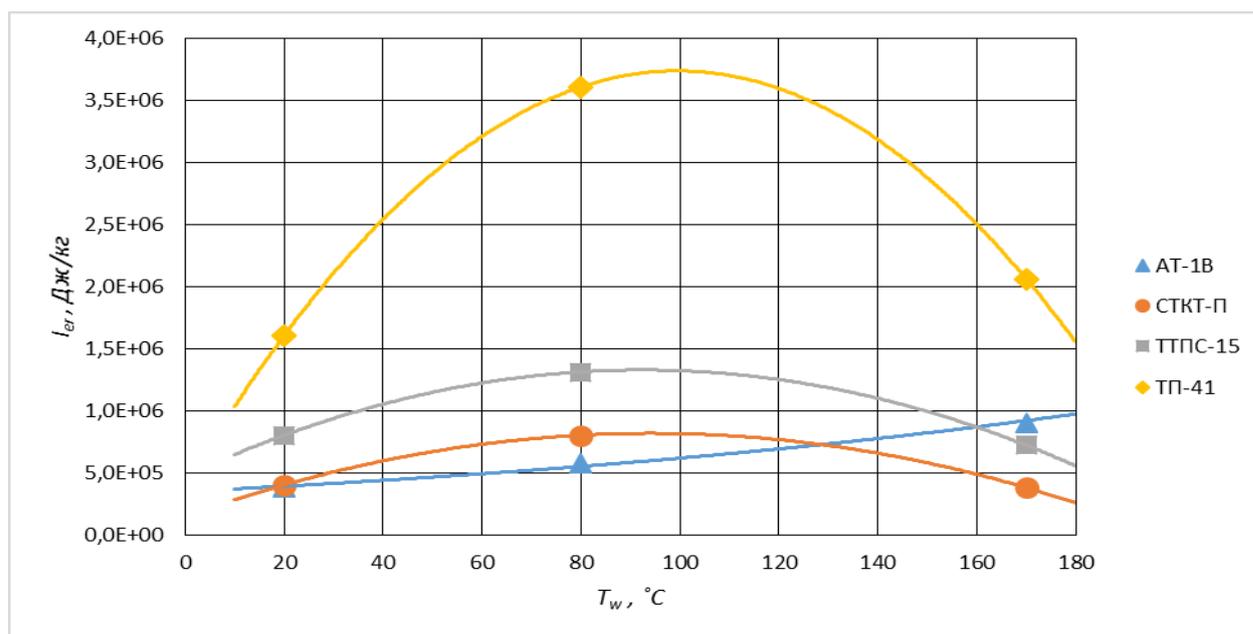


Рис. 9. Влияние температуры на энтальпию эрозионного разрушения некоторых типов композиционных ТЗМ

«К-фаза»: Al_2O_3 , $\alpha=90^\circ$, $dp=50\text{мкм}$, $Vp=170\text{м/с}$

В пятой главе предложен метод разделения тепловой $G_{20\text{моз}}$ и эрозионной G_{er} составляющих термоэрозионного уноса G_Σ конструкционных материалов при воздействии высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками. Метод строится на базе использования соотношения в виде:

$$G_{er} = G_\Sigma - G_{20\text{моз}} \quad (21)$$

Кроме того, в данной главе в результате анализа экспериментальных данных выявлены два класса конструкционных материалов (металлические и композиционные ТЗМ) с принципиально разными механизмами эрозионного разрушения при взаимодействии с высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками. При этом анализ строился на принципе сопоставления эрозионной стойкости и температуропроводности материалов. В результате установлено, что:

- для материалов с высокими значениями температуропроводности и эрозионной стойкости (металлы и их сплавы) в механизме их разрушения выполняется условие аддитивности тепловой и эрозионной составляющей теплоэрозионного разрушения материалов;

- для материалов с низкими значениями температуропроводности и эрозионной стойкости (композиционные теплозащитные материалы)

свойственна взаимозависимость тепловой и эрозионной составляющих механизма разрушения.

В главе проведен анализ экспериментальных данных с целью выявления влияния массовой концентрации частиц в гетерогенном потоке на механизм термоэрозионного разрушения стеклопластика, как широко используемого теплозащитного материала.

На рисунке 10 схематично в виде зависимости $G_{\Sigma}=f(G_p)$ представлено изображение процесса термоэрозионного разрушения стеклопластика с разделением на составляющие механизма его эрозионного разрушения.

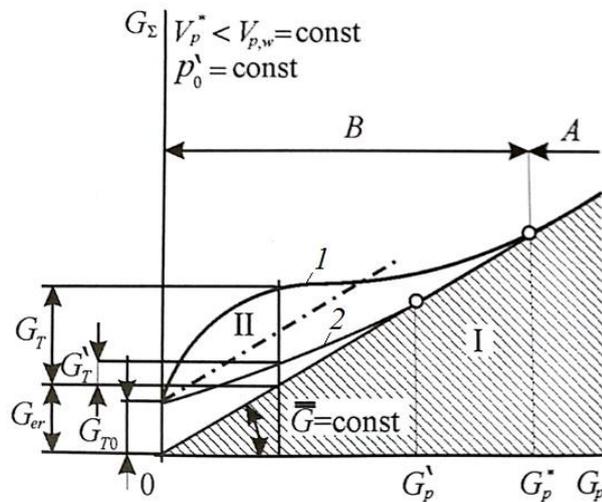


Рисунок 10. Схема термоэрозионного разрушения стеклопластика. *A* – область эрозионного механизма разрушения; *B* – область термоэрозионного механизма разрушения; *I* – область эрозионной составляющей; *II* – область тепловой составляющей; *1* – G_T с учетом интенсификации конвективного теплообмена; *2* – G_T без учёта интенсификации конвективного теплообмена

На схеме показано, что на первой стадии механизма разрушения стеклопластика с увеличением массовой концентрации частиц в потоке вначале превалирует термохимическое разрушение материала (участок II на схеме). При дальнейшем увеличении массовой концентрации частиц механизм разрушения материалов переходит в режим термоэрозионного разрушения, а затем в режим только эрозионного разрушения (участок I на схеме).

В работе также проведено исследование влияния величины удельного расхода «К-фазы» в гетерогенном потоке на процесс перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Установлено, что с увеличением массовой концентрации частиц этот процесс интенсифицируется, поскольку движущиеся

в потоке газа-носителя частицы, образуют завихрения, что вызывает турбулизацию потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Проведен анализ использования гетерогенных потоков в транспортном и энергетическом машиностроении, установлены величины основных параметров применяемых гетерогенных потоков. Рассмотрены методы и средства моделирования и диагностики при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой.

2. Проанализирована газодинамика течения гетерогенных потоков. Показано, что при моделировании газодинамики течения гетерогенных потоков целесообразно применять допущение модели взаимопроникающих континуумов. Установлены границы ее применимости. Выявлена природа основных сил, действующих в газовом потоке на изолированную частицу.

3. Предложена математическая модель газовой фазы и «К-фазы» процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. Разработана расчётная схема решения математической модели с использованием CFD комплекса ANSYS CFX. Проведена серия вычислительных экспериментов для спектра частиц разной дисперсности. Произведена визуализация и анализ полученных результатов. Показано, что:

- при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела, как и в случае адекватного обтекания гомогенным гиперзвуковым потоком, образуется отошедшая ударная волна, сжатый и пограничный слой;

- параметры твердой фазы изменяются аналогично параметрам несущей фазы, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно;

- скорость изменения параметров «К-фазы» прямо пропорциональна диаметру частицы.

4. Проведён анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды. Получены соотношения для расчёта безразмерной скорости эрозионного уноса массы.

5. Проведен критический анализ механизма эрозии нагретых конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком.

Установлено наличие пороговых значений скорости частиц и температуры, при достижении которых реализуется резкое увеличение интенсивности их эрозионного разрушения. Рекомендованы соотношения для их оценки.

6. Рассчитаны зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов. Эти данные могут быть использованы при расчёте термоэрозионного разрушения элементов конструкции высокоскоростных ЛА.

7. Проведен анализ влияния массовой концентрации частиц в гетерогенном потоке на механизм термоэрозионного разрушения стеклопластика. Получены характеристики термоэрозионного разрушения материала.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Математическая модель обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 5, № 11. – С. 490-497.

2. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 7, № 12. – С.558-565.

Публикации в других изданиях:

3. Буляккулов М.М., Головнев И.Г., Лапшин К.В., Платов С.А., Семенов А.С. Численное моделирование процесса выхода АСП из отсека самолета-носителя с оценкой совместимости и безопасности применения. // Сборник тезисов докладов II Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». Москва. ГосНИИАС. 21-22 ноября 2013. С. 184.

4. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. // Сборник тезисов докладов 14-й Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2015». Москва. МАИ. 16-20 ноября 2015. С.388-389.

5. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком космического летательного аппарата. // Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». Москва. ЦИАМ имени П.И. Баранова. 24-27 ноября 2015. С.330-331.

6. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Решение задачи взаимодействия неизотермического гетерогенного потока с поверхностью высокоскоростного летательного аппарата. // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта. 25-31 мая 2016. С.65-67.