

На правах рукописи



Буляккулов Марсель Маратович

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

Специальность
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

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: **Герасимов Юрий Иванович**, доктор технических наук, Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», главный научный сотрудник

Митрофанова Ольга Викторовна, доктор технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор

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

Защита состоится «19» декабря 2018 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 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: <https://mai.ru/upload/iblock/8d5/Dissertatsiya-Bulyakkulov.pdf>

Автореферат разослан: « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.08
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Высокоскоростные гетерогенные потоки с дисперсными примесями в виде капель жидкости или твёрдых частиц широко распространены в атмосфере в виде аномалий и являются одним из вредных факторов при эксплуатации авиационной и ракетной техники. Кроме того, эти факторы реализуются при взаимодействии конструкции ЛА со струями РДТТ, в газогенераторах, газовых и паровых турбинах, в технологии абразивной обработки деталей и т.д.

В техническом и математическом плане сложность решения задач взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с различными конструкциями 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 высокоскоростным 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 термогазодинамики 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 элементов конструкций объектов техники.

Цель работы

Работа посвящена исследованию механизма взаимодействия гетерогенных потоков с элементами конструкции высокоскоростных летательных аппаратов.

Задачи работы

Для достижения указанной цели в работе решены следующие задачи:

- проведён критический анализ моделирования процессов взаимодействия гетерогенных потоков с преградой;
- разработаны методы и средства диагностики параметров высокоскоростных гетерогенных потоков;
- проведено численное моделирование процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции летательного аппарата;
- исследован механизм взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструктивных рядов материалов;
- по результатам исследования предложены соотношения для расчёта параметров эрозионного разрушения некоторых конструктивных материалов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач и достижения указанной цели в работе использован экспериментально-теоретический метод исследования механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью отдельных конструктивных материалов. При этом концепция

экспериментального метода базировалась на обработке и анализе стендовых экспериментах данных, полученных с имитацией натуральных условий. Для проведения вычислительных экспериментов использовались компьютерные технологии - программный комплекс Ansys CFX.

Научная новизна.

Научная новизна работы выражается в том, что:

- предложена математическая модель процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции ЛА конической формы, притупленной сферой. С использованием предложенной модели проведено численное моделирование процесса обтекания гетерогенным потоком поверхности конструкции высокоскоростного ЛА;
- предложены алгоритмы расчёта скорости частиц в сверхзвуковом полидисперсном гетерогенном потоке и инерционного движения частиц сверхзвукового полидисперсного гетерогенного потока через ударную волну и сжатый слой;
- получены зависимости для расчёта скорости частиц разной дисперсности в гетерогенном потоке, вызывающей эрозию поверхности материала в момент удара о преграду, и температуры в зоне контакта при ударе высокоскоростных частиц полидисперсного гетерогенного потока о преграду.

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 предложены 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:

- в разработке математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленной сферой и проведении численных экспериментов;
- в проведении расчётно-теоретического исследования механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью ряда конструкционных материалов;
- в предложении алгоритмов и получении зависимостей, позволяющих рассчитать параметры эрозионного разрушения при воздействии высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью ряда конструкционных материалов.

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 рецензируемых научных изданиях.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по работе и списка литературы; содержит 176 страниц, 82 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 91 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 неизоэтермического 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 – источниковый член для импульса, S_E – источниковый 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:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_p |\bar{U}_F - \bar{U}_p| (\bar{U}_F - \bar{U}_p), \quad (10)$$

где C_D ¹ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, ρ_F – плотность газовой фазы, A_p – площадь миделевого сечения частицы, U_F – скорость газовой фазы.

¹ Henderson C. B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows // AIAA Journal, 1976. – V.14. – P. 707.

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 d_p .

Далее, из теории конвективного теплообмена следует, что при обтекании сферы ламинарным потоком газа критерий Нуссельта рассчитывается с использованием критериального алгебраического соотношения вида:

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

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

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

где c_p – теплоёмкость материала частицы массой m_p .

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

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 (рисунок 1). Для лучшего разрешения пристеночного пограничного слоя на поверхности ЛА применено сгущение сетки (рисунок 2).

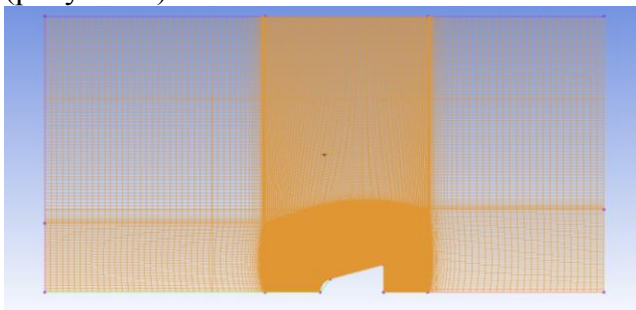


Рисунок 1. Разработанная для расчёта сеточная модель

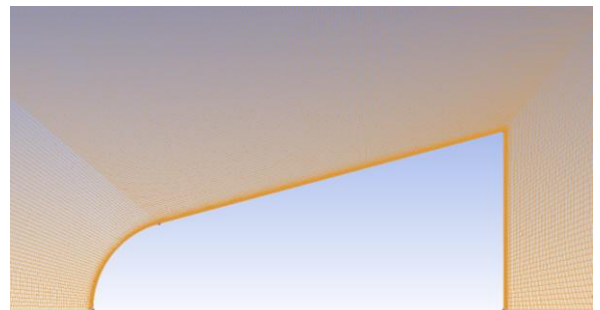


Рисунок 2. Структурированная гексаэдрическая сетка со сгущением ячеек по поверхности ЛА

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: $T_{нач}=216,66\text{ К}$, $P_{нач}=5526\text{ Па}$; $V_{нач}=50\text{ м/с}$.

В качестве граничных условий (рисунок 3) на «входе» расчётной области задавались: скорость потока $V=1800\text{ м/с}$ ($M \approx 6$), статические температура и давление газа – $T_{газ}=216,66\text{ К}$ 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: $H = 20\text{ км}$: $T_H=216,66\text{ К}$, $P_H=5526\text{ Па}$.

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.

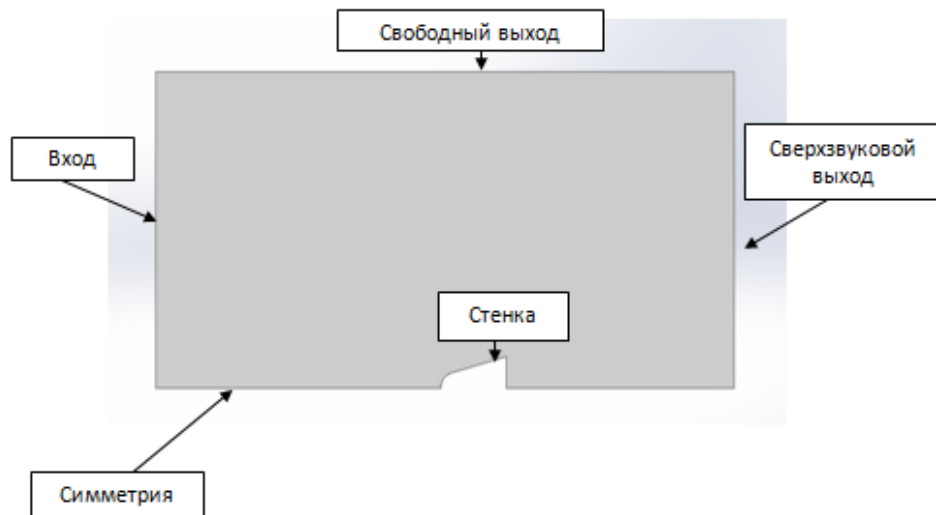


Рисунок 3. Граничные условия

В работе первый этап математического моделирования выражался 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 и расчетная модели адекватно описывают физические процессы поставленной задачи. Заданные условия однозначности соответствуют параметрам поставленной задачи и параметрам набегающего гомогенного потока вблизи поверхности ЛА.

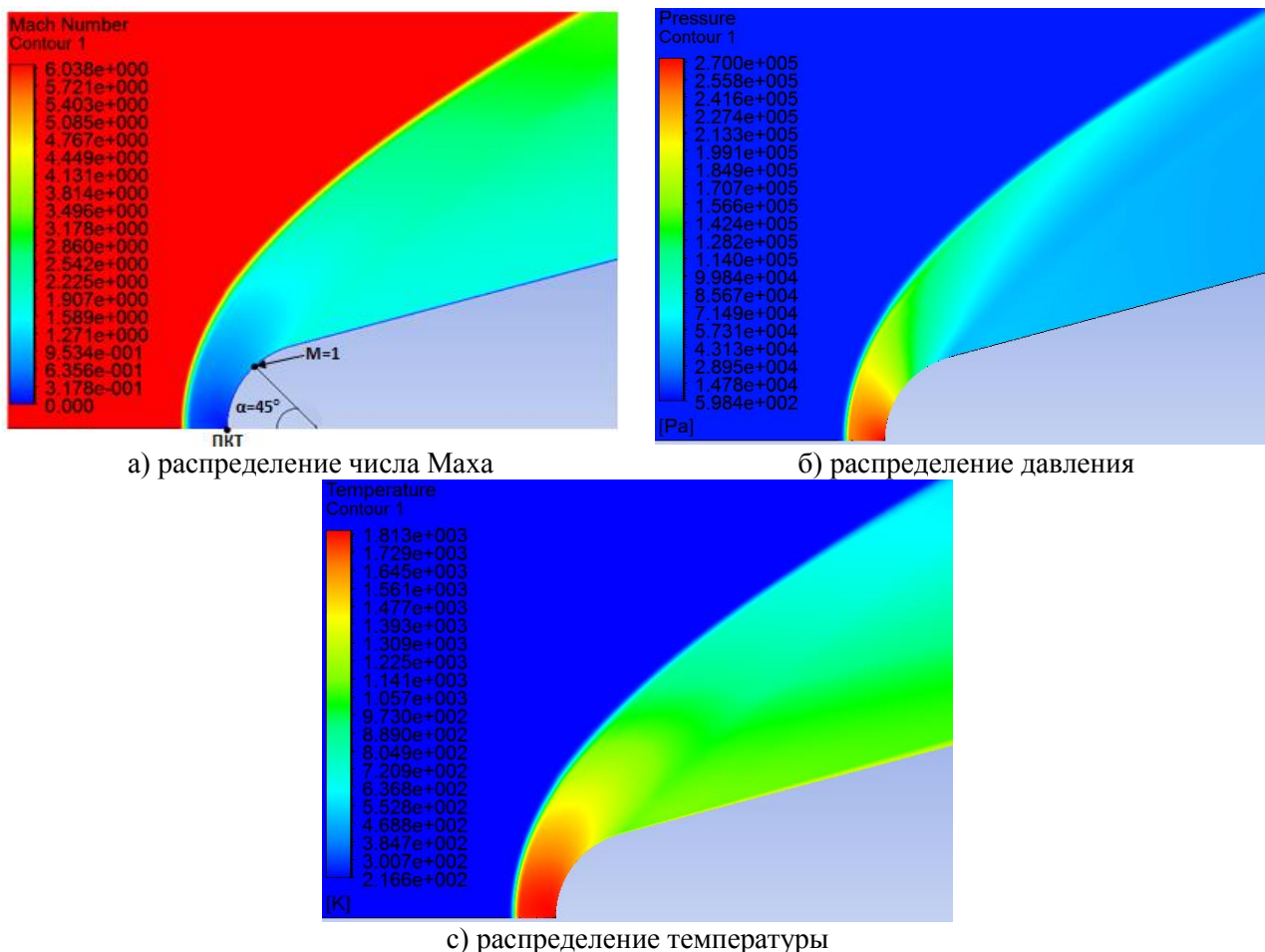
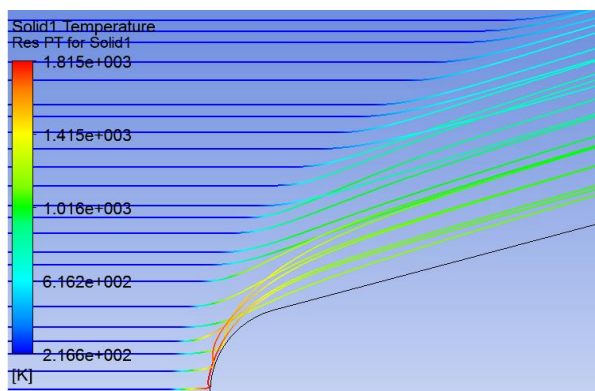


Рисунок 4. Визуализация результатов численного моделирования

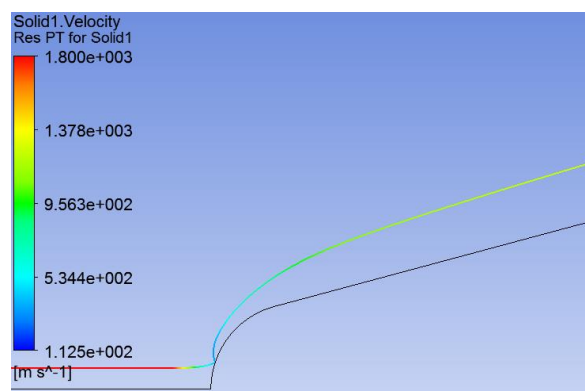
Из представленных результатов видно, что критерий Маха изменяется по поверхности сферы от $M=0$ (в передней критической точке - ПКТ) до $M=1$ (звуковая линия – $\alpha=45^\circ$) (рисунок 4а). Параметры торможения в ПКТ (рисунок 4б и 4в): давление торможения – $P_0=2,645 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура 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 $d_p = 21 \div 30 \text{ мкм}$.

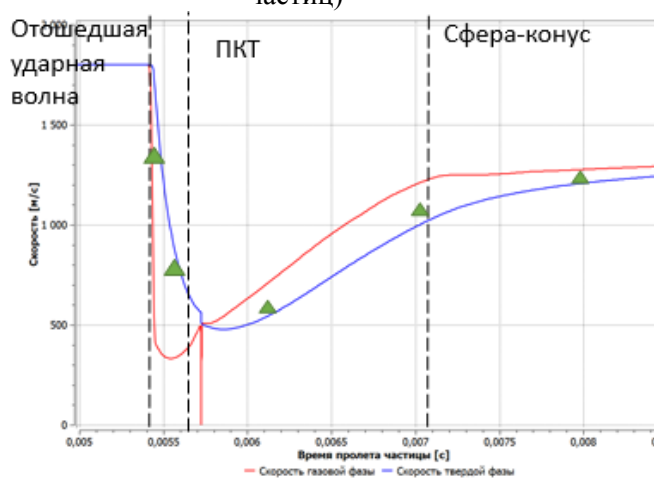
Примеры результатов численных экспериментов представлены на рисунках 5 а), б), в), г).



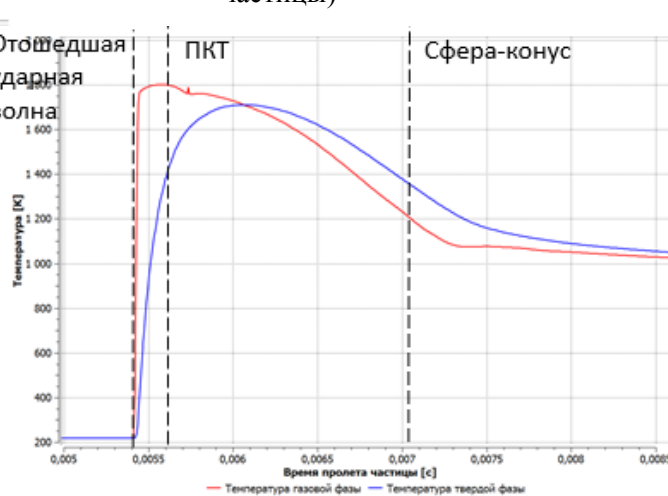
а) Траектории течения частиц вблизи ЛА (заливка цветом по значениям температуры частиц)



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



в) Скорость газовой и твердой фазы (частица $d = 15,8$ мкм). Экспериментальные данные МАИ. Грант РФФИ 07-08-00304-а (▲)



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

Рисунок 5. Результаты численного эксперимента (дисперсность частиц $d_p = 11 \div 20$ мкм)

Анализ полученных данных показал, что:

- при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед ЛА, как и в случае обтекания гомогенным гиперзвуковым потоком, образуется отошедшая ударная волна и сжатый 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» зависит от диаметра частиц.

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 ЛА, скорость «К-фазы» не равна нулю.

В четвертой главе проведено решение задачи натекания сверхзвуковой гетерогенной полидисперсной струи конечных размеров на преграду с анализом полученных результатов.

В общем случае задача двухмерная, так как при переходе через отошедшую ударную волну и сжатый слой, вектора скоростей газовой и твердой фаз меняют свое направление. В работе предлагается алгоритм, который позволяет рассчитать параметры твердой фазы (частиц) непосредственно перед ударом о поверхность. Решение задачи

проводится для двух участков. Первый из них - участок свободного течения гетерогенного потока распространяется от среза сопла до ударной волны. Данный участок определяется координатой вдоль оси потока $X = H - h$ (рисунок 6). На этом участке газодинамика течения гетерогенного потока описывается уравнениями Прандтля-Майера. Решение системы уравнений, представленной в работе позволяет рассчитать угол поворота потока γ в виде:

$$\gamma = \alpha - \varphi - (\alpha_{нач} + \varphi_{нач}), \quad (14)$$

где α - текущий угол распространения малых возмущений в потоке, φ - текущий угол наклона висячего скачка уплотнения, $\alpha_{нач}$ - угол распространения малых возмущений на срезе сопла, $\varphi_{нач}$ - текущий угол наклона висячего скачка уплотнения на срезе сопла (рисунок 6).

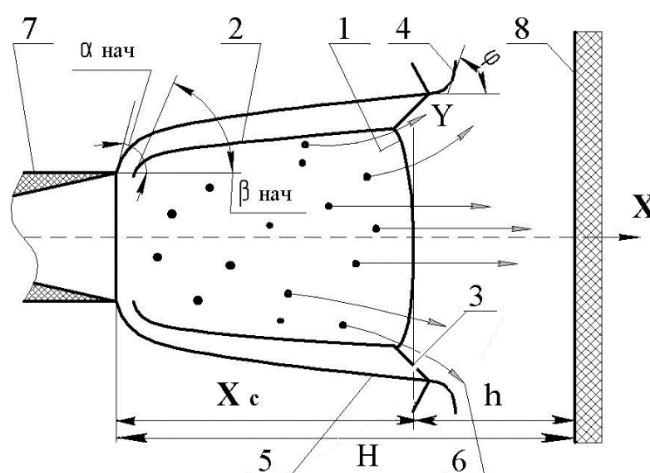


Рисунок 6. Схема течения сверхзвукового гетерогенного потока на участке Н от среза сопла до преграды

1 – ударная волна, 2 – висячий скачок уплотнения, 3 – отраженный скачок уплотнения, 4 – граница поворота потока, 5 – внешняя граница потока, 6 – траектории частиц, 7 – ускоритель, 8 – преграда, h – толщина сжатого слоя, X_c – координата ударной волны от среза ускорителя, $\alpha_{нач}$ - начальная угловая координата отраженного скачка, $\beta_{нач}$ - угловая координата висячего скачка, φ - текущая угловая координата поворота потока

Решение системы осуществляется с использованием параметров гетерогенного потока на срезе сопла. Расчёт ведется методом итераций от среза сопла до сечения X_c (рисунок 6), которое рассчитывается с использованием соотношения²:

$$X_c = 0,745d_{cp}M_{cp}\sqrt{kn} - 0,83d_{cp}M_{cp}\exp\left(-1,73\frac{X_p}{d_{cp}M_{cp}\sqrt{kn}}\right), \quad (15)$$

где d_{cp} и M_{cp} – диаметр среза сопла и число Маха на срезе сопла, $n = P_{cp}/P_n$, P_n – давление окружающей среды.

Поскольку параметры частиц при переходе через ударную волну не претерпевают разрыва, параметры газа за прямым скачком уплотнения (рисунок 6) определяются соотношения Ренкина – Гюгонио.

Результаты расчета перед ударной волной изменения скорости газовой и твердой фазы разной дисперсности от степени расширения сопла приведены на рисунке 7.

² Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. — М.: Машиностроение, 1974. – 212 с.

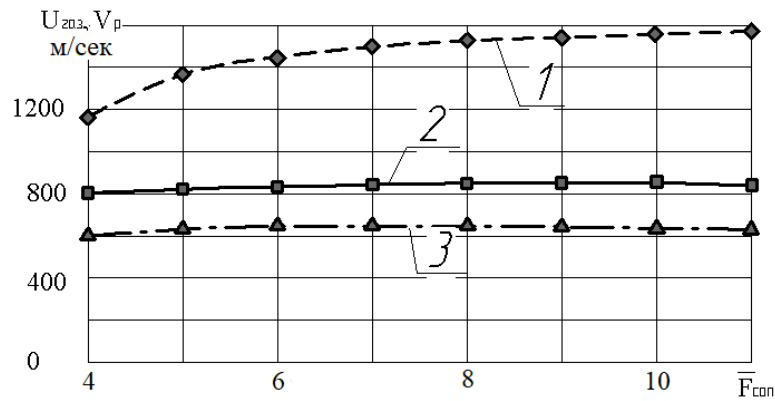


Рисунок 7. Зависимость скорости газовой $U_{\text{газ}}$ и твердой V_p фаз на срезе сопла от степени расширения

1 – скорость газовой фазы, 2 – скорость частицы диаметром 20 мкм, 3 – скорость частицы диаметром 40 мкм

Исходя из проведенного анализа, можно сформулировать общий алгоритм расчёта параметров частиц, их скорость, температуру и распределение в сверхзвуковом гетерогенном потоке. Расчёт проводится по нескольким последовательным этапам:

- по выбранному контуру ускорителя $F(x)$ рассчитывается распределение скорости $u_{\text{газ}}$ и давления $p(x)$ газовой фазы по длине канала в плоть до его среза;
- используя соотношение (15), определяется координата X_c ударной волны;
- решается система уравнений Ренкина – Гюгонио и определяются параметры газовой фазы за ударной волной.

В данной работе также решалась задача натекания сверхзвукового гетерогенного потока на преграду (плоская стенка). При этом массовая концентрация твердой фазы не превышает 10%, что практически исключает влияние наличия твердой фазы на газодинамику натекания на преграду сверхзвукового гетерогенного потока.

Задача решалась при следующих допущениях (сформулированных Стерниным Л.Е): отошедшая ударная волна плоская; плотность газа, его температура и градиенты скорости в сжатом слое постоянны; коэффициенты релаксации скорости и температуры частиц постоянны и равны значениям, вычисленным по параметрам газа и частиц после прохождения ударной волны и сжатого слоя.

Решив уравнение неразрывности с учетом принятых допущений, получим выражение для поля скоростей газовой фазы за плоской ударной волной:

$$u(x) = u_{\text{газ}} \left(1 - \frac{x}{h}\right) \quad (16) \quad \text{и} \quad v(y) = \frac{u_{\text{газ}}}{(\gamma + 1) h} y, \quad (17)$$

где x и y – текущие координаты, h – см. рисунок 6, $\gamma = 0$ для плоского и $\gamma = 1$ для осесимметричного случаев. При этом $y = y_{\text{max}} = R_{\text{ст}}$ – радиус потока перед ударной волной.

Уравнения движения и энергии для частиц с соответствующими граничными условиями имеет вид:

- уравнения движения:

$$\ddot{x}_p = \varphi_{v,p} \left[u_{\text{газ}} \left(1 - \frac{x_p}{h}\right) - \dot{x}_p \right] \quad (18), \quad \text{и} \quad \ddot{y}_p = \varphi_{v,p} \left[u_{\text{газ}} \left(\frac{u_{\text{газ}}}{(\gamma + 1) h} y_p \right) - \dot{y}_p \right], \quad (19)$$

начальные условия: $\dot{x}_p = V_p$ при $\tau = 0$, $x_p = 0$ при $\tau = 0$, $\dot{y}_p = V_{p,y}$ при $\tau = 0$, $y_p = R_{\text{ст}}$ при $\tau = 0$.

- уравнение энергии: $T_p = \varphi_{T,p} (T_{\text{газ}} - T_{p,\text{нач}}), \quad (20)$

при следующих начальных условиях: $T_p = T_{p,нач}$, при $\tau = 0$.

Система координат для сформулированной задачи приведена на рисунке 8.

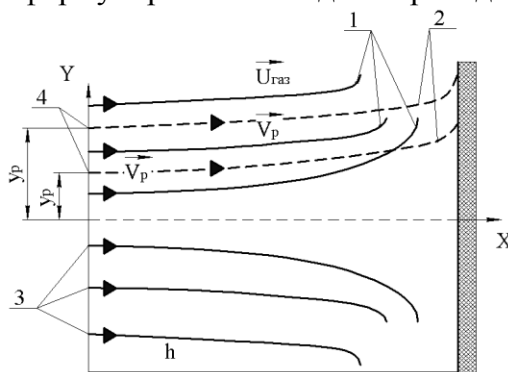


Рисунок 8. Схема высокоскоростного течения гетерогенной смеси в сжатом слое
1 – линии тока газа, 2 – траектории частиц, 3 $\vec{U}_{газ}$ – вектор скорости газа,
4 \vec{V}_p – вектор скорости частиц, y_p - поперечные координаты частиц

Решения дифференциальных уравнений (18 ÷ 20) имеют следующий вид:

- координата по направлению X:

$$x_p = h + \frac{V_p + h\lambda_{2,x}}{\lambda_{1,x} - \lambda_{2,x}} \exp(\lambda_{1,x}) + \frac{V_p + h\lambda_{1,x}}{\lambda_{2,x} - \lambda_{1,x}} \exp(\lambda_{2,x}), \quad (21)$$

где $\lambda_{x1,2} = -\frac{\varphi_{V,p}}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4u_{газ}}{\varphi_{V,p}h}} \right)$

- координата по направлению Y:

$$y_p = \frac{V_p - y_{p,нач}\lambda_{2,y}}{\lambda_{1,y} - \lambda_{2,y}} \exp(\lambda_{1,y}) + \frac{V_p - y_{p,нач}\lambda_{1,y}}{\lambda_{2,y} - \lambda_{1,y}} \exp(\lambda_{2,y}), \quad (22)$$

где $\lambda_{y1,2} = -\frac{\varphi_{V,p}}{2} \left(1 \pm \frac{4V_p}{(\gamma-1)\varphi_{V,p}h} \right)$.

- температура частицы:

$$T_p = T_{газ, сж.} - (T_{газ, сж.} - T_{p,нач}) \exp(-\varphi_{T,p}). \quad (23)$$

Коэффициенты $\varphi_{V,p}$ и $\varphi_{T,p}$ в уравнениях (21 ÷ 23) зависят от режима обтекания частицы потоком газа-носителя и её диаметра.

Анализ соотношений (21 ÷ 23) позволил установить несколько режимов реализующихся при взаимодействии сверхзвукового гетерогенного потока с плоской ограниченной стенкой, а также монотонное стремление температуры частиц T_p к температуре газа в сжатом слое. Подробный анализ выявления условий, при которых возможна реализация тех или иных режимов проводится в соответствующих разделах работы. Здесь же следует отметить, что все частицы субмикронного диапазона не достигают поверхности преграды и сносятся вниз по потоку, то есть не взаимодействуют с поверхностью. Диаметр таких частиц обратно пропорционален плотности материала.

Также в работе продемонстрировано, что динамика удара твердой частицы о преграду принципиально отличается от динамики удара жидкой частицы. В сверхзвуковых гетерогенных потоках, в которых уровни скоростей частиц достигают значений $V_p = 600 \div 1200$ м/с, динамическое давление в зоне контакта может достигать максимальных значений – до $\sim 10^{10}$ Па. Это значительно превосходит предельные значения механических свойств большинства материалов. Установлено, что ударное действие динамического давления вызывает как разрушение поверхностного слоя

материала, так и дробление падающих частиц. Например, результаты исследования процесса дробления частиц Ni при ударе о преграду приведены на рисунке 9.

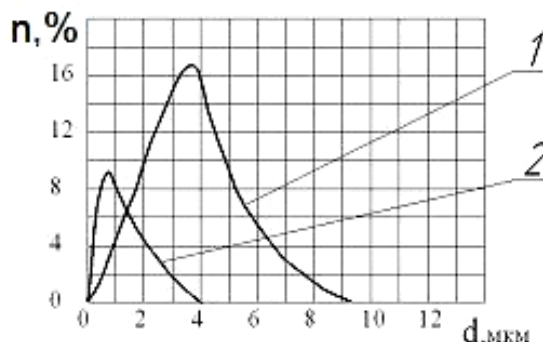


Рисунок 9. Изменение дисперсности частиц никеля при ударе о преграду
1 – дисперсия частиц в исходном порошке, 2 – дисперсия частиц в покрытии, после удара о преграду

В работе проведена также оценка изменения механических свойств материала частиц при ударе о преграду. Результаты расчёта уровней динамического давления при соударении частиц из разного рода металлов с преградой (сплав Д16) приведены в таблице 2. Скорость частиц в момент удара $V_p = 600$ м/с.

Таблица 2. Давление в пятне контакта при соударении частиц с преградой

Материал частицы	Fe	Co	Al	Cu	Zn	Ni
Давление, ГПа	13,81	12,76	5,11	10,0	7,93	12,7

Все приведенные в таблице значения давлений превышают величину предела текучести Гюгонио для выбранных материалов частиц. Следовательно, при скорости частиц $V_p = 600$ м/с и все виды частиц, используемые в расчёте, а также и подложка пластически деформируются, что сопровождается выбросом с поверхности стенки порции материала (процесс эрозии). Уровни динамических давлений при соударении столь высоки, что в процессе удара осуществляется деформационное упрочнение материала частицы. Это подтверждается исследованиями по оценке микротвердостей частиц, проведенными на приборе ПМТ - 3 при нагрузке $0,2$ Н (таблица 3).

Таблица 3. Значения микротвердости материала частиц

Материал частицы	Тип кристаллической решетки	Микротвердость исходного материала частиц, МПа	Микротвердость материала частиц после удара, МПа	Соотношение микротвердостей, %
Zn	ГПУ	400	650	163
Al	ГЦК	300	550	183
Si	ГЦК	600	1000	167
Cr	ОЦК	1150	2900	252
Fe	ОЦК	750	2100	280
Ni	ГЦК	1150	1800	156
Co	ГПУ	1150	3200	243

Величина энергии деформации преграды определяется, главным образом, двумя факторами: $E_{деф.подл} = \bar{P}_{сопр} \cdot h_{сегм}$, (24)

где $h_{сегм}$ – глубина проникновения частицы в тело преграды, $\bar{P}_{сопр}$ – сила сопротивления сжатию материала преграды.

Применение метода сферы по Бринеллю к задаче определения твердости материалов позволило получить следующую зависимость для приближенной оценки величины $E_{\text{деф.подл}}$:

$$E_{\text{деф.подл}} = 2\pi \cdot h_{\text{сегм.}}^2 \cdot d_p \cdot H_\beta . \quad (25)$$

Энергии, затраченные на нагревание частицы $E_{\text{наг.р}}$ и подложки $E_{\text{наг.под}}$, можно представить в следующем виде:

$$\text{- для частицы: } E_{\text{наг.р}} = m_{\tau,р} \cdot c_p \left(\bar{T}_{\tau,р} - T_{\text{нач.р}} \right), \quad (26)$$

где $m_{\tau,р}$ – доля прогретой массы частицы за время удара τ , $\bar{T}_{\tau,р}$ – среднемассовая температура прогретого участка частицы, c_p – удельная теплоёмкость материала частицы при температуре $\bar{T}_{\tau,р}$; $T_{\text{нач.р}}$ – средняя температура частицы перед ударом;

$$\text{- для подложки: } E_{\text{наг.подл}} = m_{\tau,подл} \cdot c_{\text{подл}} \left(\bar{T}_{\tau,подл} - T_{\text{нач.подл}} \right), \quad (27)$$

где $m_{\tau,подл}$ – доля прогретой массы подложки за время удара τ , $\bar{T}_{\tau,подл}$ – среднемассовая температура прогретого участка подложки, $c_{\text{подл}}$ – удельная теплоёмкость материала подложки при температуре $\bar{T}_{\tau,подл}$, $T_{\text{нач.подл}}$ – температура подложки перед ударом.

В данной работе с применением теории нестационарной теплопроводности твердых тел получены зависимости для оценки прогретых масс:

$$\text{- частицы: } m_{\tau,р} = 2\pi R_p \cdot \delta_p \left(h_{\text{сегм.}} - \delta_p \right) \cdot \rho_p , \quad (28)$$

$$\text{- подложки: } m_{\tau,подл} = \pi R_p \cdot \delta_{\text{подл}} \left(3h_{\text{сегм.}} + \delta_{\text{подл}} \right) \cdot \rho_{\text{подл}} . \quad (29)$$

Время удара частицы о подложку при этом составляет:

$$\tau_{\text{уд}} = \frac{r_p^2 \left(1 - \varepsilon_p \right)}{V_{0,р} \frac{\sigma_{\text{нов}}}{\sigma_{T,р}}}, \quad (28)$$

где r_p – радиус частицы, $V_{0,р}$ – скорость частицы в момент удара, ε_p – степень деформации частицы (определяется экспериментально), $\sigma_{\text{нов}}$ и $\sigma_{T,р}$ – поверхностное натяжение расплавленной частицы и предела текучести твердой частицы, соответственно.

На основе полученного решения выше поставленной задачи в работе проведен анализ особенностей эрозионного разрушения материалов при взаимодействии сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока с твёрдой стенкой.

В результате проведенного анализа из уравнения баланса энергии в момент удара в работе получены следующие зависимости:

1) для расчёта скорости частиц разной дисперсности в гетерогенном потоке, вызывающих эрозию поверхности материала:

$$V_{p,i,эр} = 1,41 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot m_i \cdot I_{эр}}{\sum_{i=1}^k n_i \cdot m_i}}, \quad (29)$$

где n_i – доля i -ых частиц одинаковой дисперсности (одинакового диаметра d_i) в составе порошка; $I_{эп}$ – эффективная энтальпия эрозии материала поверхности преграды.

В настоящее время в инженерной практике непосредственное использование формулы (29) для оценки критической скорости эрозии не всегда возможно, поскольку значения эффективной энтальпии разрушения $I_{эп}$ для большинства материалов не известны, так как этот параметр определяется экспериментально. Однако используя имеющиеся в публикациях данные, в работе проведена оценка величин критической скорости эрозии для разного рода материалов. Например, для медной подложки (марка меди М-1, с $T_{пл}=1356\text{ K}$) значение критической скорости частицы, вызывающую эрозию поверхности, составляет величину $V_P = 1230\text{ м/сек}^3$.

2) Для определения температуры поверхности частицы и преграды в зоне удара:

$$T_{уд} = \frac{0,5 \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot V_{p,i}^2 - \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \dot{m}_{эп} \cdot I_{эп} - \sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \dot{m}_{дробл} \cdot Q_{дробл. частиц}}{\sum_i^k n_i \cdot m_i \cdot \bar{C}_P} \quad (29)$$

В пятой главе проведён анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды из металлических и неметаллических материалов.

Установлено наличие критического значения температуры $T_{кр}$, при достижении которой и дальнейшем повышении температуры поверхности, безразмерная скорость

разрушения материала $\bar{G}_{w,эп} = \frac{\dot{m}_{эп}}{\dot{m}_p} = \frac{V_p^2}{2I_{эп}}$ резко возрастает (рисунок 10).

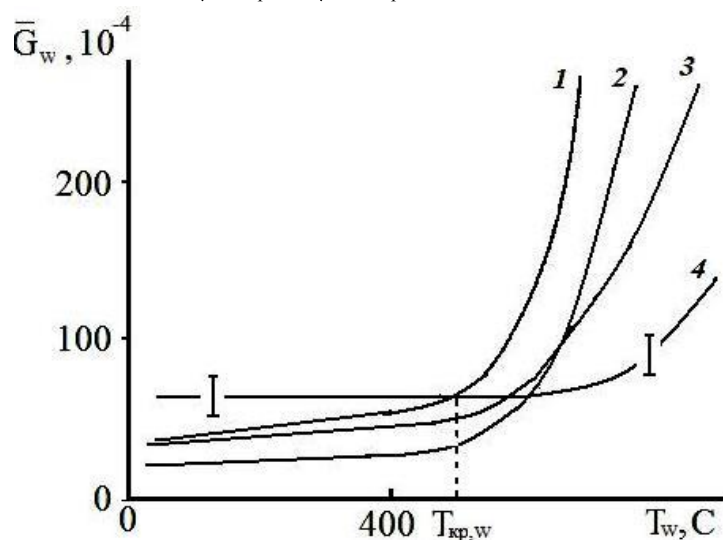


Рисунок 10. Зависимость безразмерной скорости эрозионного разрушения углеродистых и легированной сталей, а также титанового сплава от температуры подложки⁴

Частицы – SiO_2 дисперсностью $d_p = 5\div 40$ мкм, угол атаки $\alpha = 90^\circ$, скорость частиц в момент удара $V_p = \sim 500$ м/с, 1 – сталь Ст.3, 2 – сталь 45, 3 – сталь X18H9T, 4 – титановый сплав

Анализ экспериментальных данных настоящей работы показал, что с относительной погрешностью $\pm 15\%$ значение критической температуры $T_{w,кр}$ для конструкционных металлических материалов можно представить зависимостью:

³ Расчёт проведён для монодисперсного медного порошка с диаметром частиц $d_{cu} = 20$ мкм.

⁴ На рисунке линии – аппроксимация экспериментальных данных.

$$T_{w,кр} \approx T_{пл}/2. \quad (30)$$

При дальнейшем анализе экспериментальных данных в данной работе составлен алгоритм развития физического механизма эрозионного разрушения материалов (металлов) в высокоскоростных гетерогенных потоках, то есть выявлен физический механизм эрозионного разрушения материалов. Схематически алгоритм развития физического механизма эрозионного разрушения металлов прослеживается из данных рисунков 11 и 12. Сущность механизма выражается в том, что в процессе эрозионного разрушения металлических материалов явно проявляются две стадии (кривые 1 и 2 на рисунках 11 и 12). Стадия 1 реализуется при низких значениях интенсивности потока частиц m_p ($0 \leq m_p \leq m_{p,кр}$). На этой стадии функция $\dot{m}_{w,эп} = f(m_p)$ является нелинейной. При увеличении m_p до уровня $m_p \geq m_{p,кр}$ функция $\dot{m}_{w,эп} = f(m_p)$, становится линейной, то есть наступает стадия 2 эрозионного разрушения.

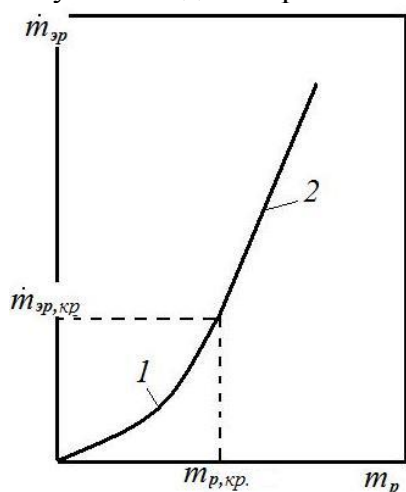


Рисунок 11. Схема механизма физического эрозионного разрушения металлов и сплавов при воздействии гетерогенным потоком с постоянной скоростью частиц ($V_p = const$)

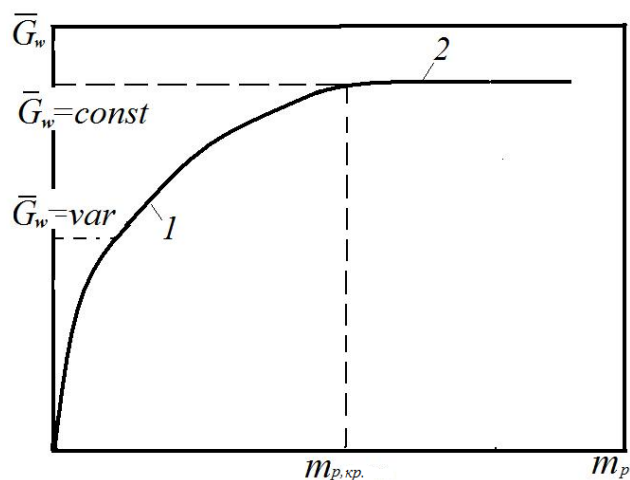


Рисунок 12. Качественная зависимость безразмерной скорости \bar{G} эрозионного разрушения материалов (металлов и сплавов) от интенсивности воздействия на поверхность удельной массы m_p частиц набегающего гетерогенного потока

Для режима разрушения, при котором безразмерная скорость разрушения металлов \bar{G}_w становится величиной постоянной, определено критическое значение скорости соударения частиц $V_{p,кр}$ с поверхностью преграды:

$$V_{эп,кр} = 1,41 \sqrt{I_{эп} \frac{\rho_m}{\rho_p}}, \quad (31)$$

где ρ_m и ρ_p — плотности материалов преграды и частиц соответственно, $I_{эп}$ — энтальпия эрозии материала преграды. При этом использовано понятие $I_{эп}$ в виде:

$$I_{эп} = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_{эп}} \cdot \frac{V_p^2}{2}. \quad (32)$$

На основе анализа полученных в работе экспериментальных данных показано, что эффективная энтальпия эрозии $I_{эп}$ конструкционных металлических материалов уменьшается с увеличением температуры поверхности (рисунок 13). Это обусловлено снижением микротвёрдости металлических материалов с увеличением температуры.

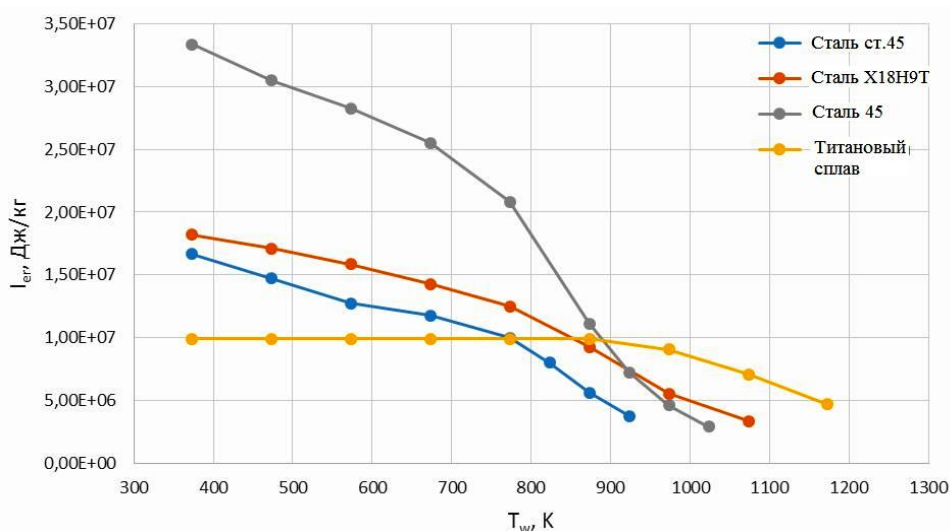


Рисунок 13. Зависимость эффективной энтальпии эрозии $I_{эр}$ некоторых конструкционных металлических материалов от температуры поверхности T_w

В данной работе проведено также исследование особенностей механизма разрушения неметаллических материалов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков. Такое исследование приведено на примере анализа экспериментальных данных стеклопластика ТЗМКТ-8 – типичного представителя неметаллических материалов, широко используемых в качестве ТЗМ в изделиях авиационной и ракетной техники.

Из анализа экспериментальных данных (рисунок 14) установлено, что уменьшение $I_{эр}$ стеклопластика в случае увеличения дисперсности частиц, очевидно, обусловлено тем, что частицы с большей дисперсией преодолевают сжатый и пограничный слой без потерь скорости. В результате в момент удара о поверхность образца частицы с большей дисперсностью интенсифицируют процесс эрозии материала, что снижает уровень $I_{эр}$.

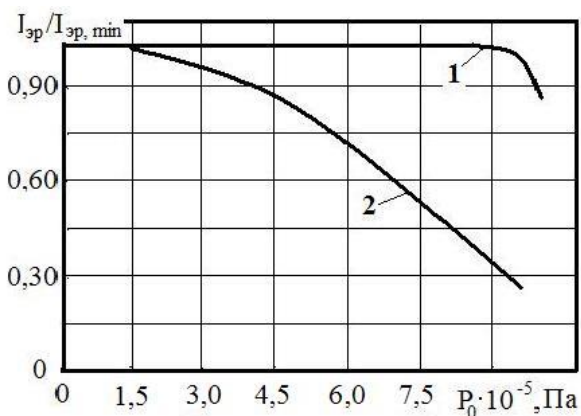


Рисунок 14. Изменение эффективной энтальпии эрозии $I_{эр}$ стеклопластика ТЗМКТ-8 при воздействии сверхзвукового гетерогенного потока с разными уровнями давления торможения $P_0 = \text{var}$ и дисперсностью частиц $d_p = 10 \div 15 \mu\text{m}$ и $d_p = 45 \div 50 \mu\text{m}$.

$I_{эр, \text{min}}$ – эрозия материала при $P_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Содержание «К-фазы» в гетерогенных потоках 20%.

1- $d_p = 10 \div 15 \mu\text{m}$, температура поверхности $T_w = 1400 \text{ К}$, 2 - $d_p = 45 \div 50 \mu\text{m}$, температура поверхности $T_w = 1200 \text{ К}$

⁵ Гетерогенный поток воздействовал по нормали к поверхности образца.

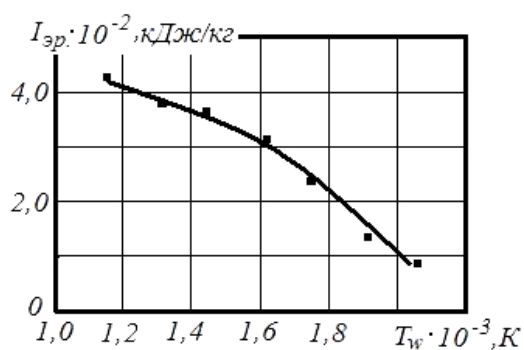


Рисунок 15. Изменения энтальпии эрозии стеклопластика ТЗМКТ-8 от температуры поверхности материала и скорости удара частиц о поверхность образца.

Частицы - SiC, угол атаки частиц $\alpha=90^\circ$, дисперсность $d_p=(20\div 50)$ мкм, скорость частиц в потоке $V_p \approx 900$ м/с, массовая концентрация частиц SiC в потоке (10÷15) %

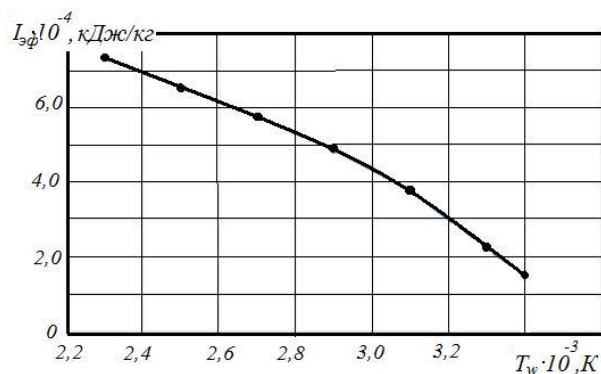


Рисунок 16. Изменения эффективной энтальпии термохимического разрушения стеклопластика ТЗМКТ-8 в условиях воздействия гомогенного сверхзвукового высокотемпературного потока воздуха

Дальнейший анализ экспериментальных данных показал, что при прочих равных тепловых параметрах набегающих потоков энтальпия эрозионного разрушения стеклопластика в случае воздействия гетерогенного потока более, чем на два порядка величины превосходит энтальпию термохимического разрушения в условиях воздействия гомогенного сверхзвукового высокотемпературного потока воздуха (см. рисунки 15 и 16).

Кроме стеклопластических ТЗМ в работе проведены исследования механизма разрушения углерод-углеродных композиционных материалов двух типов: УУКМ-1 и плотного кристаллического графита В-1. Указанные материалы широко используются в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники.

В результате проведенного анализа экспериментальных данных материала УУКМ-1 (рисунок 17) показано, что:

1. эрозионная скорость уноса массы материала интенсивно возрастает при достижении температуры поверхности уровня $T_w > 1500 K$;
2. эрозионная скорость уноса массы материала зависит от дисперсности падающих на поверхность высокоскоростных частиц. Скорость частиц в гетерогенном потоке изменялась в диапазоне ($V_p \approx 170\div 850$ м/с);
3. при прочих равных условиях эрозионная скорость уноса массы композита УУКМ-1 всегда больше скорости уноса массы материала при воздействии гомогенного воздушного потока.

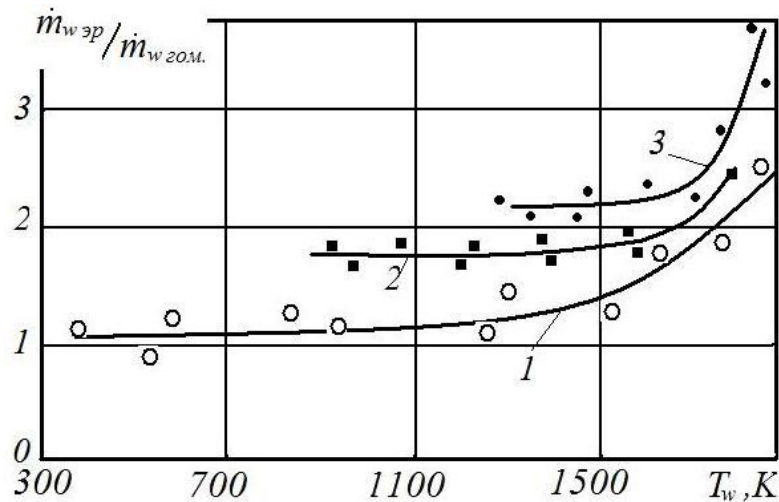


Рисунок 17. Изменение относительной скорости уноса массы материала УУКМ-1 от температуры поверхности T_w и дисперсности частиц в потоке

1 – дисперсность частиц SiC, $d_p=(4\div 10)$ мкм; 2 – дисперсность частиц SiC, $d_p=(15\div 25)$ мкм; 3 – дисперсность частиц SiC, $d_p=(30\div 50)$ мкм. Параметры гетерогенного потока: $P_0=12\cdot 10^5$ Па, $I_0\approx 2,5\cdot 10^3$ кДж/кг, массовая концентрация частиц в потоке $\sim 15\%$.
1 – заимствованные данные⁶, 2 и 3 – данные настоящей работы

Проведены экспериментальные исследования по выявлению *влияния угла падения частиц (угла атаки)* сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока на обрабатываемую поверхность плотного поликристаллического графита В-1 (см. рисунок 18). Установлено, что с увеличением угла атаки частиц значение эрозионной скорости уноса массы плотного поликристаллического графита В-1 более чем в два раза возрастает по сравнению с аналогичным параметром при нулевом угле атаки. Причём с увеличением скорости частиц влияние угла атаки проявляется более существенно.

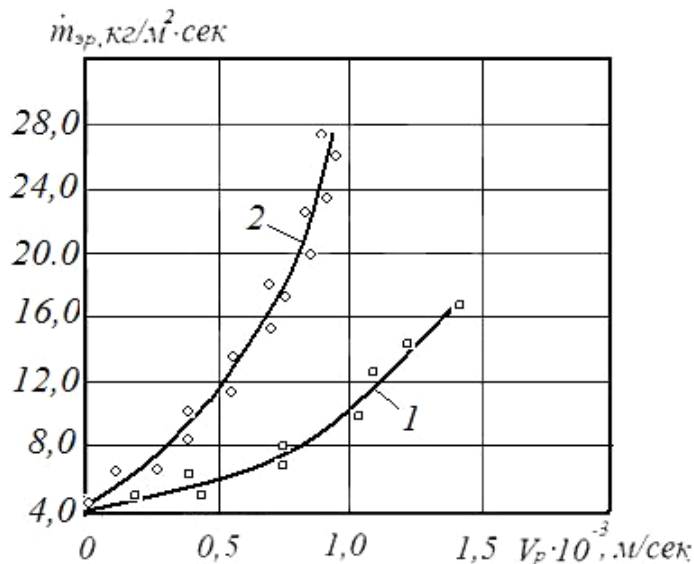


Рисунок 18. Изменение скорости уноса массы поликристаллического графита В-1 от скорости частиц гетерогенного потока при разных углах атаки

Параметры гетерогенного потока: $P_0=12\cdot 10^5$ Па, $I_0\approx 2,5\cdot 10^3$ кДж/кг, дисперсность частиц SiC, $d_p=(30\div 50)$ мкм, массовая концентрация частиц в потоке $\sim 15\%$.
1- угол атаки частиц в потоке $\alpha = 0^\circ$, 2- угол атаки $\alpha = 20^\circ$

⁶ Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. – М.: Янус-К, 2007. – 392 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований можно сделать 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. Предложена 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 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» зависит от диаметра частиц.

4. Проведён анализ термо-газодинамики течения сверхзвукового гетерогенного полидисперсного потока при натекании на плоскую преграду. Получено соотношение для расчёта скорости частиц разной дисперсности в гетерогенном потоке, вызывающих эрозию поверхности материала в момент удара о преграду, и зависимость для расчёта температуры в зоне контакта при ударе высокоскоростных частиц полидисперсного гетерогенного потока о преграду.

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 ТЗ элементов конструкции высокоскоростных ЛА.

7. Проведены экспериментальные исследования по выявлению влияния угла падения частиц (угла атаки) сверхзвукового высокотемпературного гетерогенного потока на обрабатываемую поверхность плотного поликристаллического графита В-1. Установлено, что с увеличением угла атаки частиц значение эрозионной скорости уноса массы плотного поликристаллического графита В-1 более чем в два раза возрастает по сравнению с аналогичным параметром при нулевом угле атаки.

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 научных 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.