

## ТЕРМОЭРОЗИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКАХ

Татьяна Викторовна ЕРШОВА родилась в городе Люберцы Московской области. Ведущий инженер Объединенного института высоких температур РАН. Основные научные интересы — в области создания сверхзвуковых потоков и исследования в них стойкости теплозащитных материалов. Автор 12 научных работ. E-mail:pn280837@yandex.ru

Tatyana V. ERSHOVA, was born in the Moscow Region. She is a Principal Engineer at the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Science. Her research interests are in supersonic flows generation and using them to investigate of thermal stability of heat-protection materials. She has published over 12 technical papers. E-mail:pn280837@yandex.ru

Петр Васильевич НИКИТИН родился в 1937 г. в Могилевской области. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области термодинамики, тепломассообмена, тепловой защиты, гетерогенных потоков, разнофункциональных покрытий, теплозащитных материалов. Автор 210 научных работ. E-mail:pn280837@yandex.ru

Peter V. NIKITIN, D.Sci, was born in 1937, in the Mogiliov Region. He is a Professor at the MAI. His research interests are in thermodynamics, heat and mass exchange, heat protection, heterogeneous flows, multi-functional coatings, heat-protection materials. He has published over 210 technical papers. E-mail:pn280837@yandex.ru

*В статье представлены результаты изучения влияния полидисперсности набегающего гетерогенного потока на термоэрозионное разрушение теплозащитных материалов. Получены данные, указывающие на возможную интерференцию (наложение) температурных полей при воздействии частиц разных размеров. Показано, что добавление в гетерогенный поток, несущий крупные частицы, более мелких частиц вызывает уменьшение суммарной скорости разрушения теплозащитного материала.*

*An analysis is carried out to study influence of heterogeneous incident flow polydispersity on thermo-erosive destruction for heat-protection materials. Obtained results indicate possible interference between temperature fields under the influence of various-sized particles. It is shown that incorporation of smaller particles into heterogeneous flow carrying large particles causes a reduction of total destruction speed for the heat-protection material.*

**Ключевые слова:** сверхзвуковой гетерогенный поток, теплообмен, температурное поле, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты, квазистационарный режим разрушения.

**Key words:** supersonic heterogeneous flow, heat exchange, temperature field, thermo-chemical and thermo-erosive destruction of thermal protection, quasi-stationary destruction mode.

### Условные обозначения и сокращения

$H_{er}$  — эффективная энтальпия эрозионного разрушения ТЗМ;

$T_s$  — среднеинтегральная температура поверхностного слоя;

$\sigma_{вр}$  — предел прочности при растяжении материала преграды;

$c_m$  — теплоемкость материала стенки;

$\rho_m$  — плотность материала стенки;

$\lambda_m$  — теплопроводность материала стенки;

$\tau$  — время;

$y$  — координата, перпендикулярная поверхности тела;

$L$  — характерный размер теплозащитного покрытия;

$q_w$  — суммарная плотность теплового потока в проницаемую поверхность;

$T_w$  — температура поверхности;

$T_m$  — температура термохимического разрушения;

$H_{ef}$  — эффективная энтальпия термохимического разрушения;

$i_w$  — линейная скорость термохимического разрушения;

$T_0$  — температура торможения;  
 $\epsilon_w$  — степень черноты поверхности стенки ТЗ;  
 $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана;  
 $k_f$  — коэффициент усиления (интенсификации) теплообмена;  
 $q_0$  — удельный тепловой поток к непроницаемой поверхности тела в гомогенном потоке газа;  
 $\Delta q$  — доля усиления теплового потока к поверхности, обусловленное гетерогенностью потока;  
 $d_p$  — диаметр мелких частиц в гетерогенном потоке;  
 $G_p$  — удельный поток массы твердой фазы в гетерогенном потоке;  
 $\alpha$  — суммарный коэффициент теплоотдачи к поверхности тела с учетом интенсификации;  
 $\alpha_0$  — коэффициент теплоотдачи к поверхности тела в гомогенном потоке;  
 $p_0$  — давление торможения;  
 $\mu_0$  — коэффициент динамической вязкости газа при температуре торможения;  
 $\rho_0$  — плотность газа при  $p_0$  и  $T_0$ ;  
 $V$  — скорость газа за ударной волной;  
 $V_{pw}$  — скорость удара частиц о стенку;  
 $R_N$  — радиус притупления обтекаемой поверхности ГЛА;  
 $\varphi_N$  — коэффициент формы поверхности;  
 $z_{p\infty}$  — массовая доля частиц в набегающем потоке;  
 $M_\infty$  — число Маха набегающего потока;  
 $c_p$  — теплоемкость газа;  
 $\beta$  — градиент скорости газа;  
 $\mu_w$  — коэффициент динамической вязкости газа при температуре поверхности;  
 $\rho_w$  — плотность газа при температуре поверхности;  
 $p_2$  — давление газа за ударной волной;  
 $p_\infty$  — статическое давление газа в набегающем потоке;  
 $D_p$  — диаметр крупных частиц в потоке;  
 $\rho_p$  — плотность материала частиц;  
 $H$  — высота полета;  
 $\Delta$  — толщина унесенного слоя ТЗ;  
 $\tau_f$  — характерное время переходного процесса от квазистационарного термохимического разрушения к квазистационарному термоэрозионному разрушению;

ТЗ — тепловая защита;  
 ТЗМ — теплозащитный материал;  
 ГЛА — гиперзвуковой летательный аппарат;  
 УУКМ — углерод-углеродный композиционный материал.

## Введение

Концепция данной расчетной работы строится на базе основных положений монографии [1], сформулированных по результатам исследования конвективного теплообмена и разрушения теплозащитных материалов (ТЗМ) в сверхзвуковых гетерогенных потоках. Анализируется процесс тепло- и массообмена на поверхности ТЗ высокоскоростного летательного аппарата (ГЛА) при его горизонтальном полете. Сначала рассматривается процесс тепло- и массообмена при полете ГЛА в чистой, безоблачной атмосфере — аэродинамический нагрев и термохимическое разрушение ТЗ в гомогенном воздушном потоке. Затем ГЛА входит в пылевое облако и анализируется аэродинамический нагрев и термоэрозионное разрушение ТЗ в гетерогенном воздушном потоке.

В анализе за начальный момент принимается время, когда ЛА входит в запыленное облако и по его поверхности ударяет первая частица. В этот момент тепловое состояние поверхности ТЗ соответствует состоянию ГЛА в предшествующем полете в чистой атмосфере. Начальный момент времени характеризуется тем, что начинается переходный процесс от квазистационарного термохимического разрушения ТЗ в гомогенном потоке к термоэрозионному разрушению в гетерогенном потоке.

В данной работе анализируется переходный процесс, развивающийся до момента установления как квазистационарной температуры поверхности ТЗ, так и квазистационарной линейной скорости ее разрушения. Под термином «квазистационарная» понимается практически постоянная температура поверхности и скорость разрушения материала, которая реализуется в условиях установившегося теплового состояния поверхностного слоя.

Таким образом, анализируемый в работе процесс разрушения ТЗ соответствует периоду изменения температурного профиля по толщине слоя от начального, соответствующего квазистационарному профилю при термохимическом разрушении, до конечного, отвечающего квазистационарному профилю при термоэрозионном разрушении. При этом используются результаты экспериментальных исследований стойкости теплозащитных материалов к воздействию сверхзвуковых гетерогенных потоков, полученных в лабораторных условиях [3].

1. Предмет исследования

В работе [3] экспериментально получены зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения  $H_{er}$  от среднеинтегральной температуры прогрева поверхностного слоя  $T_s$  (теплого состояния прогретого слоя) для двух теплозащитных материалов:

- стеклопластик, для которого, как следует из рис. 1, характерно монотонное убывание эффектив-

ной энтальпии эрозионного разрушения  $H_{er}$  с ростом температуры  $T_s$ ;

- углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ), для которого, как следует из рис. 2, характерно слабое изменение эффективной энтальпии эрозионного разрушения  $H_{er}$  с ростом температуры поверхности  $T_s$ . Такая зависимость наблюдается в значительном температурном диапазоне  $T_s$  (от комнатной температуры до примерно 1800—

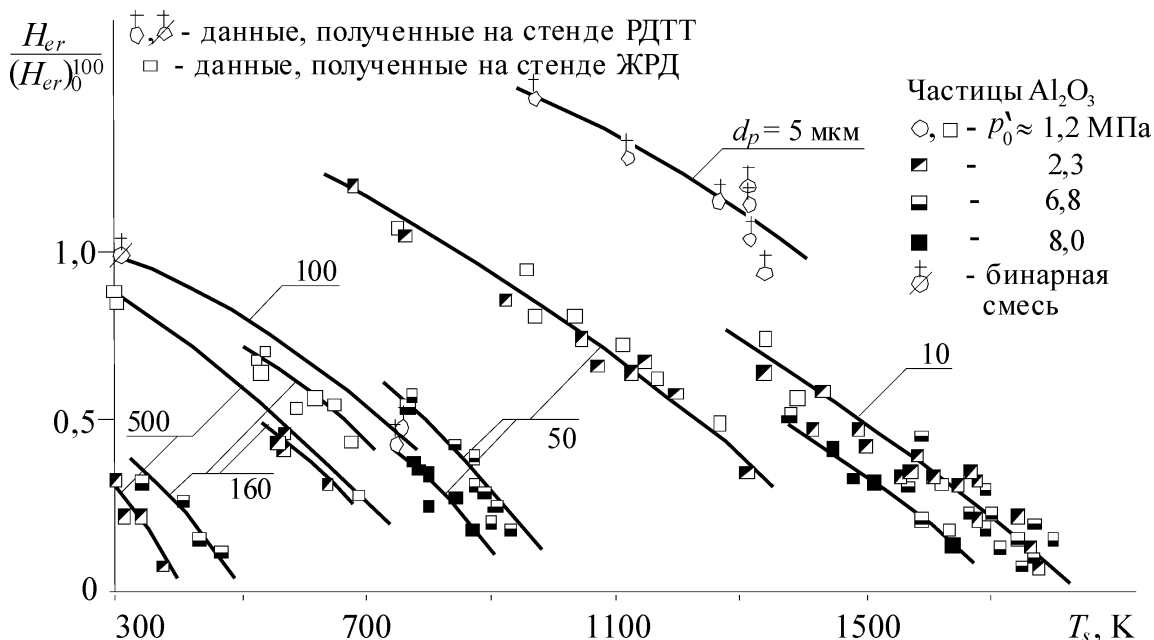


Рис. 1. Зависимость эффективной энтальпии разрушения стеклопластика от среднеинтегральной температуры прогрева поверхностного слоя, размера частиц и давления торможения:  $(H_{er})_0^{100}$  — эффективная энтальпия, измеренная для частиц размером  $d_p = 100$  мкм при давлении торможения  $p_0' = 1,2$  МПа и температуре  $T_s = 300$  К

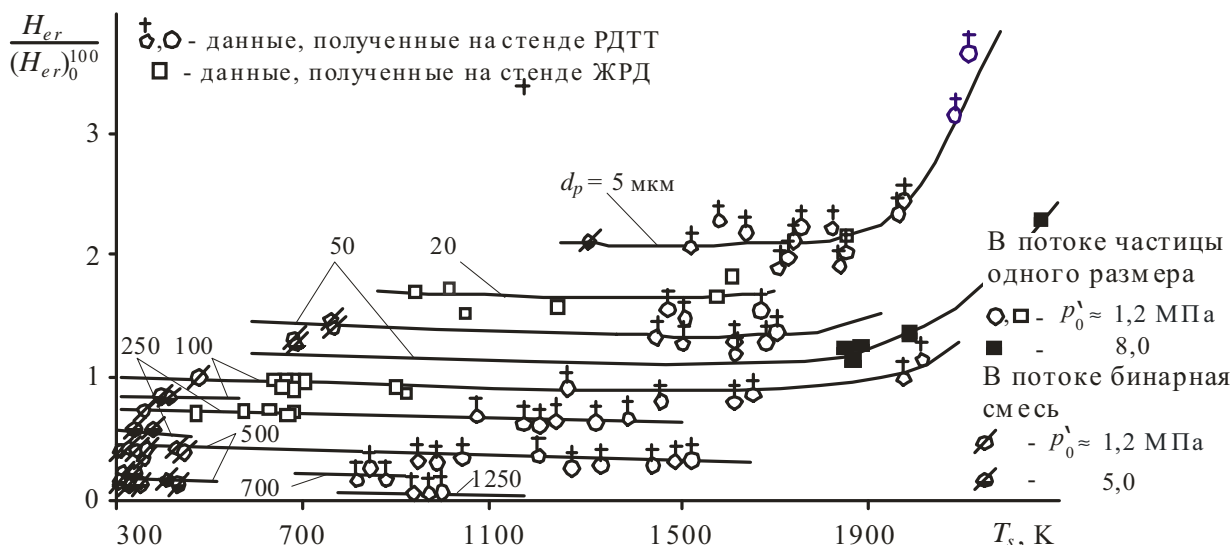


Рис. 2. Зависимость эффективной энтальпии разрушения углерод-углеродной композиции от среднеинтегральной температуры прогрева поверхностного слоя, размера частиц и давления торможения:  $(H_{er})_0^{100}$  — эффективная энтальпия, измеренная для частиц размером  $d_p = 100$  мкм при давлении торможения  $p_0' = 1,2$  МПа и температуре  $T_s = 300$  К

1900 К). При дальнейшем росте температуры  $T_s$  зависимость  $H_{er}(T_s)$  увеличивается в несколько раз, после чего резко уменьшается\*. Установлено [3], что такое поведение  $H_{er}(T_s)$  в широком диапазоне изменения температуры поверхности  $T_s$  коррелируется с характером зависимости механических свойств материала от температуры  $\sigma(T)$ .

Итак, экспериментально установлено [3], что оба материала эффективно работают в разных температурных диапазонах:

— стеклопластик — от комнатных температур до  $T_s \approx 1000 \div 1500$  К в зависимости от размеров частиц;

— УУКМ — от комнатной температуры до  $T_s \approx 2600 \div 2700$  К.

Таким образом, поскольку в реальном полете в гетерогенной атмосфере на лобовой поверхности ГЛА может реализовываться температура до уровня 2500 К и выше, то оба материала имеют свои эксплуатационные ниши для использования в качестве термоэрозионной защиты аппарата. Это определяет необходимость дальнейшего исследования механизма разрушения указанных материалов при воздействии на них высокоскоростных гетерогенных потоков. Такие исследования проведены в последующих разделах статьи.

## 2. Постановка задачи

В предыдущем разделе проведен анализ результатов, полученных экспериментально [3]. Ниже проводится дальнейшее исследование механизма разрушения стеклопластика и углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) с использованием численного эксперимента. Постановка задачи сводится к следующему. Рассматриваются процессы тепло- и массообмена в условиях, соответствующих поставленному в [3] эксперименту. Концепция анализа строится на заимствованной из работы [1] модели эрозионного разрушения ТЗМ. Как известно, в основу этой модели положено импульсное, послойное разрушение ТЗМ. В той же работе в качестве параметра оценки этого эффекта впервые введено понятие эффективной энтальпии эрозионного разрушения  $H_{er}$ . В этой связи в данной статье анализируется причина, вызывающая сильную зависимость эффективной энтальпии эрозии  $H_{er}$  от температуры поверхности материалов  $T_s$ . Это является характерной особенностью для ряда ТЗМ, выявленной экспериментально [3]. Данный эффект необходимо учитывать при прогнозировании

поведения материалов в условиях полета ГЛА. С этой целью в статье наряду с уравнениями эрозионного уноса решается уравнение нестационарной теплопроводности в разрушающемся материале. В одномерной постановке уравнение имеет вид

$$c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_m \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (1)$$

При решении (1) использовались следующие краевые условия:

- начальное условие: при  $\tau = 0$   $T(0, y) = T_{in}(y)$ ;
- граничные условия:
  - на внутренней поверхности ( $y = L$ )

$$\lambda_m dT/dy = -q_L;$$

- на внешней поверхности ( $y = y_w$ ): при отсутствии термохимического разрушения

$$(T(\tau, y_w) = T_w < T_m) \quad \lambda_m dT/dy = -q_w,$$

- при наличии термохимического разрушения

$$(T(\tau, y_w) = T_w = T_m) \quad \lambda_m dT/dy = -q_w - \dot{i}_w \rho_m H_{ef}.$$

Здесь  $q_w$  — плотность теплового потока, поступающего к уносимой (подвижной) поверхности,

$q_w = \alpha(T_0 - T_w) - \epsilon \sigma T_w^4$ ;  $\dot{i}_w$  — скорость термохимического разрушения;  $T_w = T_m$  и  $H_{ef}$  — температура и удельная энтальпия термохимического разрушения;  $T_0$  — температура торможения потока.

Для расчета тепловых потоков при обтекании затупленного тела сверхзвуковым гетерогенным потоком используется разработанная в [1] полуэмпирическая модель теплообмена. Сущность этой модели сводится к тому, что при оценке теплового потока вводится понятие коэффициента усиления конвективного теплообмена  $k_f$ , обусловленного наличием гетерогенной фазы. При этом коэффициент усиления теплообмена вследствие гетерогенности потока рассчитывается по формулам

$$k_f = \frac{q_0 + \Delta q}{q_0}; \quad \frac{\Delta q}{q_0} = \psi \frac{c V_{pw}^3 \rho_0 \sqrt{R_N}}{(\rho_0)^{0,25}};$$

$$c = \frac{z_{p\infty} \sqrt{d_p} \sqrt{\varphi_N}}{A \sqrt{2M_\infty}}; \quad z_{pw} = \frac{G_p}{\rho_0 V},$$

\* Фактически экспериментально полученная зависимость  $H_{er}(T_s)$  ограничена в большинстве случаев температурой  $T_s < 2250$  К. Но подобие экспериментальной и табличной зависимости  $\sigma_{вр}(T)$  в названном диапазоне температур позволяет предположить правильность экстраполяции зависимости  $H_{er}(T_s)$  до уровня примерно  $T_s < 2700$  К.

где  $d_p$  — диаметр частиц;  $G_p$  — удельный поток массы твердой фазы в гетерогенном потоке;  $p_0$ ,  $\rho_0$  — давление, плотность торможения;  $V$  и  $V_{p,w}$  — скорости газа за ударной волной и частиц в момент удара о поверхность соответственно;  $\psi$  — коэффициент, определяемый экспериментально,  $\psi = 1,3 \cdot 10^{-7}$ .

В результате суммарный коэффициент теплоотдачи, который используется в качестве граничного условия, определяется как  $\alpha = k_f \alpha_0$ , где  $\alpha_0$  — коэффициент теплоотдачи при воздействии на поверхность ТЗ гомогенного потока при прочих равных условиях. Для передней критической точки без учета химических реакций в пограничном слое коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0$  рассчитывается с использованием уравнения конвективного теплообмена Фэя—Риддела в виде [5]

$$\alpha_0 = 0,763 \text{Pr}_w^{-2/3} \cdot c_{p,w} \cdot \left( \frac{\mu_w \rho_w}{\mu_0 \rho_0} \right)^{0,1} \cdot \sqrt{\beta \mu_0 \rho_0}. \quad (2)$$

Здесь индексами «w» и «0» обозначены параметры газовой фазы при температуре поверхности и за ударной волной соответственно;  $\beta$  — градиент скорости газа в окрестности критической точки, который представляется в виде

$$\beta = \sqrt{2(p_0 - p_\infty)/\rho_0} / R_N. \quad (3)$$

Таким образом, исследование процесса термоэрозионного разрушения в условиях полета ГЛА включает следующие основные этапы:

- определение газодинамических параметров набегающего потока по заданным траекторным данным аппарата;
- расчет параметров газа в сжатом слое между ударной волной и обтекаемым телом;
- расчет кинематики частиц и межфазного теплообмена в сжатом слое с целью определения параметров частиц в момент соударения с поверхностью;
- расчет теплообмена на непроницаемой поверхности ТЗ при ее обтекании гетерогенным потоком;
- совместное решение уравнений импульсного разрушения и теплопереноса на проницаемой поверхности.

### 3. Результаты исследований и их анализ

Используется неявная двухслойная разностная схема на подвижной сетке, связанной с внешней

поверхностью обтекаемого тела. Взаимосвязь уравнений эрозионного разрушения и распространения тепла в материале осуществляется с помощью последовательных приближений.

В работе на основе экспериментальных данных и описанной математической модели проводится исследование аэродинамического нагрева и эрозионного разрушения ТЗ в условиях горизонтального полета ГЛА. Рассматривается теплообмен в передней критической точке сферического притупления при бесконечной протяженности пылевого облака и постоянных параметрах гомогенного и гетерогенного набегающих потоков. Для определения скорости соударения частиц с объектом решается уравнение движения для каждой одиночной частицы в сжатом слое. При этом коэффициент сопротивления частиц рассчитывается по формуле Хендерсона [6].

В численном эксперименте использовались следующие параметры термохимического разрушения, заимствованные из [4]:

— для стеклопластика: температура плавления кварцевого каркаса  $T_m \approx 2000$  К, эффективная энтальпия термохимического разрушения  $H_{ef} \approx 3000$  кДж/кг;

— для углерод-углеродного композиционного материала: температура поверхности  $T_w \approx 2500$  К, эффективная энтальпия термохимического разрушения  $H_{ef} \approx 12000$  кДж/кг.

#### 3.1. Анализ процесса разрушения стеклопластика в гетерогенном потоке

При расчете в гетерогенном потоке использовались крупные частицы диаметром  $D_p = 50$  мкм и мелкие частицы диаметром  $d_p = 5$  и  $10$  мкм. Плотность материала частиц  $\rho_p = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Удельные массовые потоки крупных и мелких частиц одинаковы —  $5$  кг/м<sup>2</sup>с. Радиус притупления моделей  $R_N = 0,04$  и  $0,1$  м. Скорость полета соответствовала числу Маха  $M = 8$ . Высота полета ГЛА  $H = 10$  км.

На рис. 3 показан ход процесса термоэрозионного разрушения стеклопластика на начальном этапе, воздействия моно- и полидисперсного гетерогенных потоков. При этом рассматриваются дискретные удары одиночных частиц (удары с определенной частотой).

Анализ представленных на рис. 3,а данных (монодисперсный гетерогенный поток) показывает, что для крупных частиц изменение профиля температуры в поверхностном слое осуществляется в две стадии. На первой стадии осуществляется разрушение высокотемпературной части материала путем механического воздействия гетерогенной фазы.

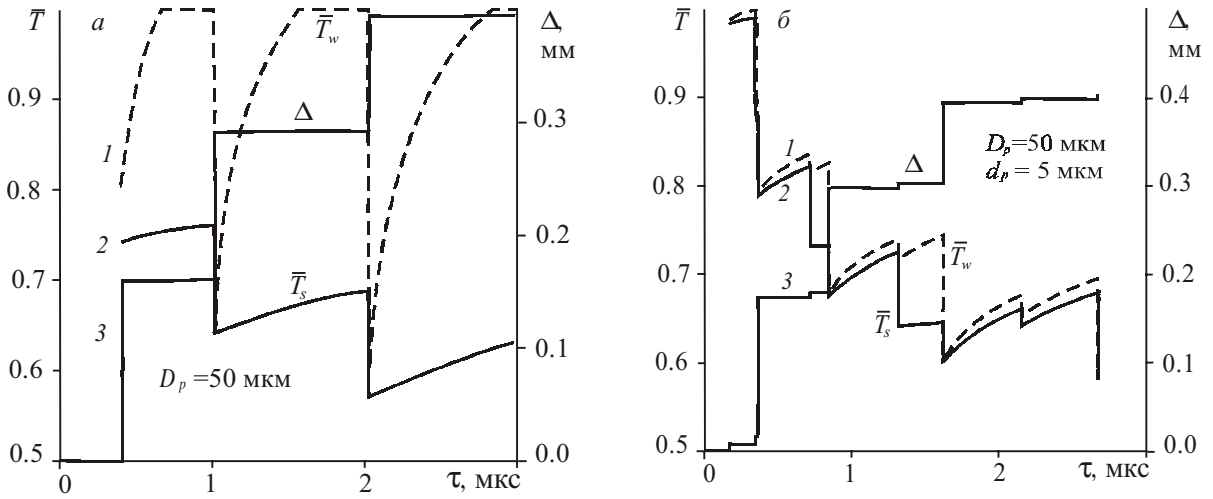


Рис. 3. Начальный этап процесса термоэрозионного разрушения стеклопластика в гетерогенном потоке:

1 — температуры поверхности  $T_w$ ; 2 — среднеинтегральная температура поверхностного слоя  $\bar{T}_s$ ;

3 — толщина унесенного слоя  $\Delta$ ; а — в потоке только частицы 50 мкм;

б — в потоке смесь частиц 5 и 50 мкм

Глубина такого разрушения соответствует глубине кратера, образовавшегося в материале при ударе частицы.

На второй стадии во временном интервале между последовательными ударами частиц за счет теплообмена в гомогенном потоке происходит нагрев материала до температуры термохимического разрушения.

Очевидно процесс эрозионного уноса (первая стадия) представляет собой локальный взрыв, вызванный взаимодействием высокоскоростной частицы с нагретой поверхностью ТЗМ. В этом случае глубина кратера распространяется на всю толщину прогретого непрочного слоя. В свою очередь, тол-

щина прогретого слоя, которая образуется в промежутке между ударами частиц, рассчитывается с использованием теории нестационарной теплопроводности в виде  $y(\tau) = \sqrt{a \cdot \tau}$ .

В целом отмеченные выше тенденции характерны для начального момента процесса термоэрозионного разрушения. Однако установлено, что они существуют и при дальнейшем развитии процесса. Например, аналогичное поведение температур поверхности и толщин уносимого слоя проявляется и на развитой стадии, близкой к выходу процесса разрушения на квазистационарный режим (рис. 4, обозначения, как на рис. 3). Видно, что характер

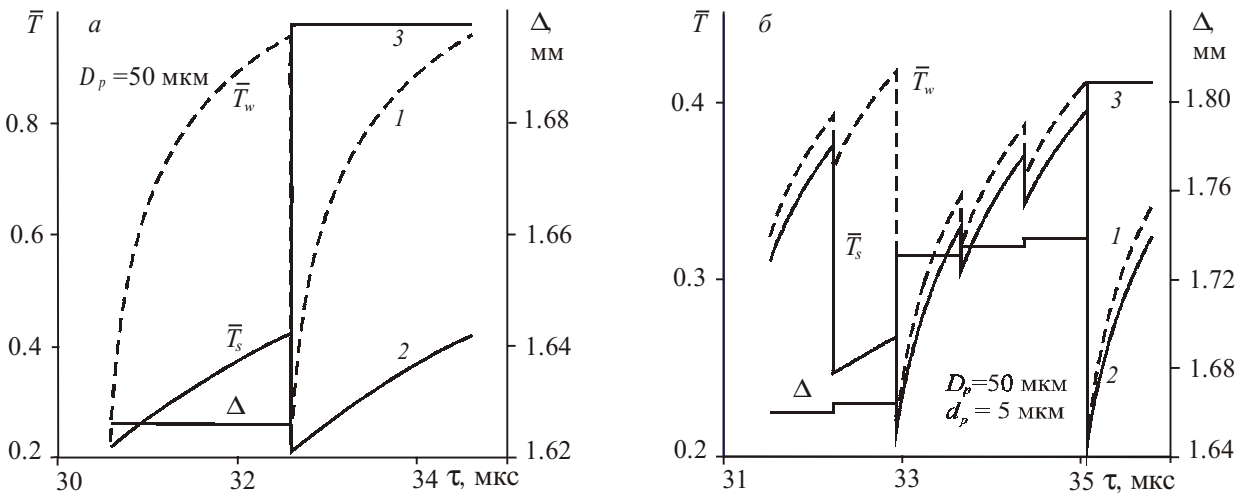


Рис. 4. Развитая стадия процесса термоэрозионного разрушения стеклопластика:

а — в потоке только частицы 50 мкм; б — в потоке смесь частиц 5 и 50 мкм

кривых аналогичен характеру соответствующих кривых рис. 3. Наблюдаемое заметное понижение среднеинтегральной температуры поверхностного слоя обусловлено, как отмечено выше, влиянием частиц мелкодисперсной фракции.

На рис. 5 показан ход процесса термоэрозионного разрушения при воздействии монодисперсного, частицы 50 мкм (рис. 5,а) и полидисперсного, частицы 5, 10 и 50 мкм (рис. 5,б).

хностного слоя за счет ударов мелких частиц, что приводит к повышению энтальпии эрозионного разрушения и уменьшению разрушающего воздействия крупных частиц.

Результаты анализа представлены на рис. 6, где наблюдается отличие гладкой линии от маркированной штрихами, что характеризует влияние полидисперсности гетерогенного потока. То есть дополнительное разрушающее воздействие мелкодисперсной фракции частично компенсируется умень-

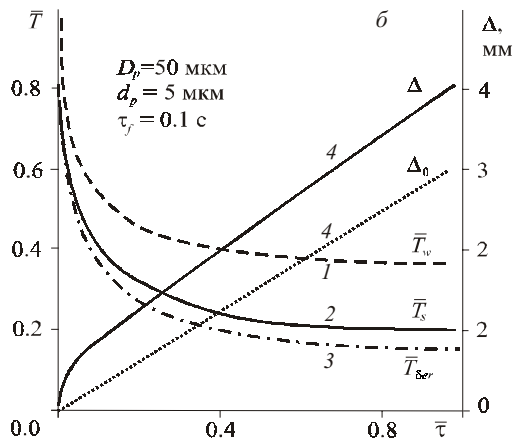
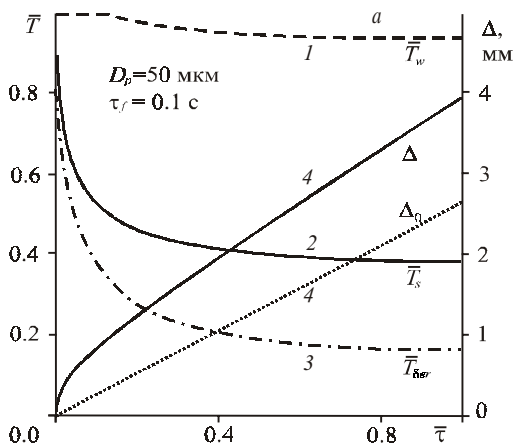


Рис. 5. Развитие хода процесса термоэрозионного разрушения стеклопластика за время экспозиции гетерогенных потоков:

1 — температура поверхности; 2, 3 — среднеинтегральная температура слоя и температура материала на дне кратера; 4 — толщина унесенного слоя; а — в потоке только частицы 50 мкм; б — в потоке смесь частиц 5 и 50 мкм

Все параметры рассчитаны в моменты взаимодействия (столкновения) крупных частиц с поверхностью. Время отнесено к характерному времени процесса  $\tau_f$ .

Штриховой кривой 4 показана зависимость линейного уноса, характерная для чисто эрозионного разрушения. Линейность зависимости от времени указывает на постоянство линейной скорости разрушения материала. Различие сплошной и штриховой зависимостей 4 иллюстрирует, таким образом, влияние зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения от температуры на толщину унесенного материала. В последнем случае штриховая кривая соответствует аддитивному воздействию на материал обеих фракций.

Сравнение этих вариантов указывает на две противоречивые тенденции, проявляющиеся при переходе от монодисперсной фракции к полидисперсной. Первая из них непосредственно связана с наличием дополнительной примеси частиц, что приводит к дополнительному разрушению материала, вторая — проявляется опосредованно через понижение среднеинтегральной температуры поверх-

шением температуры поверхностного слоя. Наиболее ярко этот эффект проявляется, когда ударный слой достаточно мощный и оказывает сильное тормозящее воздействие на частицы. Это отражено на рис. 6,б, где видно, что увеличение радиуса притупления модели в 2,5 раза ( $R_N = 0,1$  м) вызывает уменьшение разрушения материала при прочих равных условиях.

На рис. 7 показано изменение суммарной линейной скорости уноса образца, отнесенной к скорости уноса образца при наличии в потоке только крупных частиц (верхняя кривая) и увеличении концентрации мелких частиц (другие кривые).

Видно, что при добавлении в поток частиц того же размера ( $d_p = D_p$ ) зависимость носит линейный характер. А при добавлении в поток мелких частиц, диаметр которых  $d_p$  в 5 и 10 раз меньше диаметра крупных  $D_p$ , зависимость не только нелинейная, но и отражает значительное уменьшение скорости уноса мелких частиц ( $d_p = 0,1 D_p$ ).

Отмеченное выше можно объяснить процессом интерференции (наложения) температурных полей, возникающих при воздействии частиц разного размера: крупных и мелких.

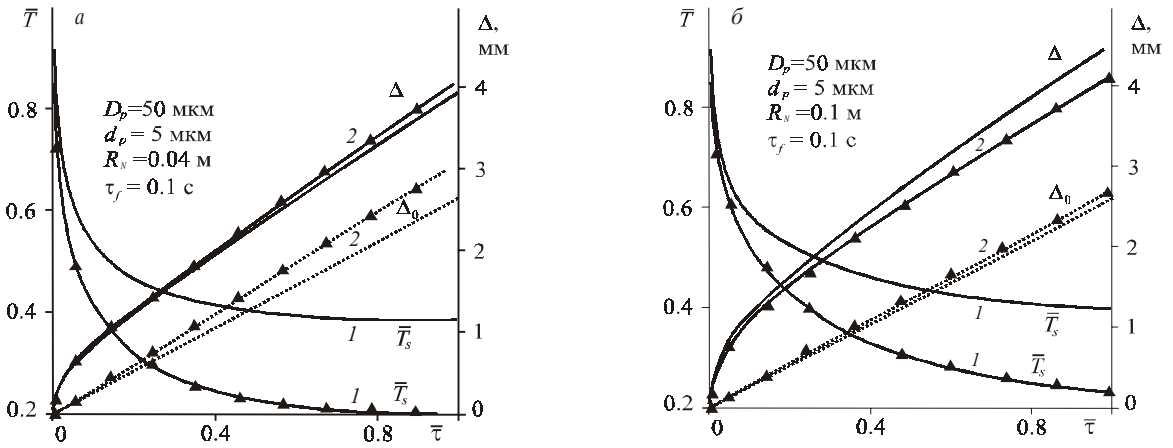


Рис. 6. Влияние на процесс термоэрозивного разрушения стеклопластика радиуса притупления обтекаемого тела (толщины ударного слоя):  
 1 — изменение среднеинтегральной температуры поверхностного слоя; 2 — количество унесенного материала (штриховые кривые соответствуют постоянной энтальпии эрозивного разрушения);  
 а — радиус притупления  $R_n = 0,04$  м; б — радиус притупления  $R_n = 0,1$  м

Далее проведем анализ процесса термоэрозивного разрушения углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ). Соответствующие результаты приведены на рис. 8, где диаметр частиц крупной фракции составлял  $D_p = 100$  мкм, мелкодисперсной —  $d_p = 5$  мкм. Остальные параметры аналогичны указанным выше для стеклопластика.

УУКМ характеризуется немонотонной, но менее сильной зависимостью энтальпии эрозивного разрушения от температуры. При этом для рассматриваемого диапазона «рабочих» параметров появляется область, в которой энтальпия эрозивного разрушения с ростом температуры повышается.

Таким образом, отмеченные выше для стеклопластика тенденции сохраняются, но перестают

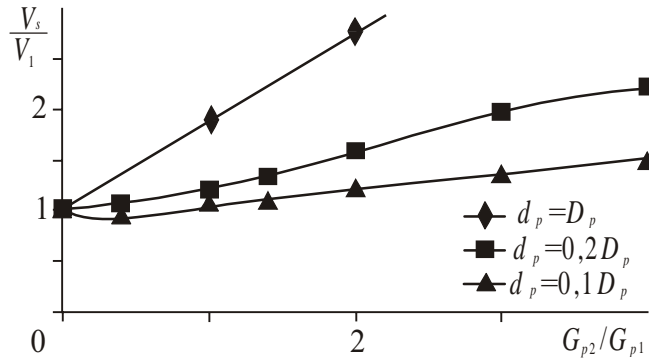


Рис. 7. Изменение суммарной скорости уноса с увеличением концентрации мелких частиц

быть противоречивыми. Видно, что толщина унесенного слоя, рассчитанная с учетом температур-

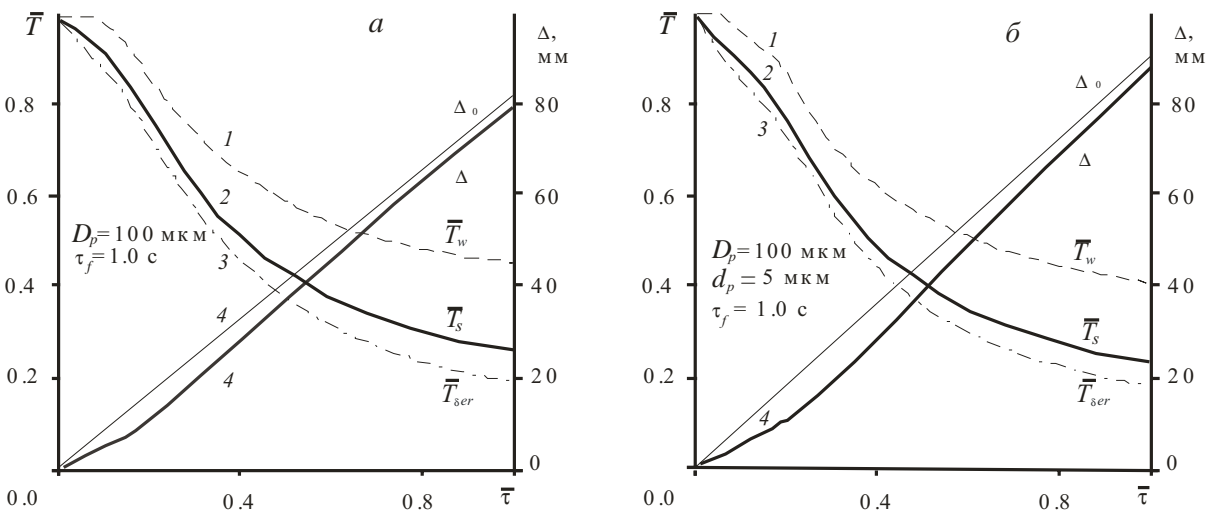


Рис. 8. Ход процесса термоэрозивного разрушения УУКМ:  
 а — в гетерогенном потоке только крупные частицы; б — смесь крупных и мелких частиц



ной зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения от температуры несколько меньше, чем аналогичная величина при постоянной энтальпии. При этом влияние дополнительной, мелкой, фракции частиц для обоих вариантов увеличивается незначительно, что позволяет сделать вывод о возможности аддитивного учета полидисперсности потока на разрушение углеродного теплозащитного материала.

#### Выводы

В статье исследовано влияние полидисперсности набегающего гетерогенного потока на термоэрозионное разрушение теплозащитных материалов. Полученные результаты указывают на возможную интерференцию температурных полей при воздействии на материал частиц разного размера. Обнаружено, что добавление в поток мелких частиц приводит к, казалось бы, парадоксальному факту — уменьшению скорости разрушения материала.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-08-00444 и № 08-08-00244-а).*

#### Библиографический список

1. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. — М.: Янус-К, 2007.
2. Материалы и покрытия в экстремальных условиях. Взгляд в будущее: В 3 т. — Т. 3. Экспериментальные исследования / Под ред. Ю.В. Полежаева и С.В. Резника. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
3. Машиностроение. Энциклопедия в 40 т. Т. 1-2. Теоретическая механика, термодинамика, теплообмен / Под ред. К.С. Колесникова, А.И. Леонтьева. — М.: Машиностроение, 1999.
4. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. — М.: Энергия, 1976.
5. Фэй Дж., Риддел Ф. Теоретический анализ теплообмена в лобовой точке, омываемой диссоциированным воздухом // Проблемы движения головной части ракет дальнего действия. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
6. Henderson C. B., AIAA Journal 14, 707, 1976.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 12.09.2009