На правах рукописи

Маслов Евгений Анатольевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГЕТЕРОГЕННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУЕЙ

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2006

Диссертация выполнена на кафедре теплофизики и гидромеханики теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета и на кафедре физической и вычислительной механики механико-математического факультета Томского государственного университета.

Научные руководители:	доктор физико-математических наук, профессор Кузнецов Гений Владимирович; кандидат физико-математических наук, доцент Жарова Ирина Константиновна
Официальные оппоненты:	Борзых В.Э., профессор, д.ф.-м.н. Матвиенко О.В., профессор, д.ф.-м.н.
Ведущая организация:	Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения (Московская область)

Защита состоится 22 декабря 2006 года в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, НИИ прикладной математики и механики, ауд. 407.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 17 ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н. Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Взаимодействие высокотемпературных гетерогенных струй с твердой поверхностью является одной из фундаментальных проблем теплофизики, а также механики жидкости. Эта проблема имеет также и практическое значение. Гетерогенные высокотемпературные струи могут использоваться в различных технологиях резки, перфорации, обработки поверхности конструкционных материалов (КМ). При этом воздействие высокотемпературных струй на конструкционные материалы является гораздо более сложным процессом, чем воздействие «холодного» газа с твердыми частицами, так как высокие температуры интенсифицируют физико-механические процессы, протекающие на поверхности и в тонком приповерхностном слое материала.

Несмотря на значимость рассматриваемых проблем и их неординарность, до настоящего времени не сформулированы математические модели, описывающие с приемлемой для практического применения достоверностью процессы взаимодействия гетерогенных (и даже гомогенных) струй с КМ в широком диапазоне изменения параметров. Наиболее значимые результаты, достигнутые научным коллективом под руководством Ю.В. Полежаева, получены для достаточно узкого диапазона изменения параметров. В частности, для низких концентраций дисперсной фазы в потоке.

Достаточно обширные экспериментальные данные, полученные коллективом исследователей под руководством В.Е. Абалтусова, показывают возможность и перспективность применения высокотемпературных гетерогенных струй для резки и перфорации КМ. Однако результаты экспериментальных исследований не были обобщены на уровне построения математических моделей.

Более поздние исследования ученых, работавших по данному направлению, привели к созданию физических основ процесса разрушения конструкционных материалов под действием гетерогенных высокотемпературных струй, являющихся продуктами сгорания специальных топливных композиций. Но в этих работах нет выхода на математическое моделирование исследуемых процессов, без которого невозможна разработка промышленных технологий и специального оборудования.

Анализ известных экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что на скорость разрушения КМ в рассматриваемых условиях влияют давление торможения и концентрация частиц дисперсной фазы в потоке. Но о влиянии многих значимых факторов (температуры газа и частиц, скорости движения, прочности конструкционного материала, теплофизических характеристик материалов, условий теплообмена, режима течения) пока нет объективных данных.

Математические модели, описывающие процессы «тепломеханической» эрозии КМ при относительно низких (до 0,01 по массе) концентрациях частиц в струе не могут, как показывают специальные исследования, автоматически

применяться для моделирования комплекса процессов, протекающих при воздействии на материал потоков с высокой концентрацией частиц.

Необходимо отметить, что частицы (твердые или жидкие) играют основную роль в создании условий разрушения КМ как в режиме резки, так и перфорации. Соответственно параметры частиц (скорость, плотность, размеры и, возможно, другие) влияют на скорость уноса массы материала в рассматриваемых условиях. Следовательно, для решения задачи о разрушении КМ при взаимодействии с гетерогенной струей необходимо знать скорости движения частиц при ударе о поверхность и ряд других характеристик частиц. Определить эти параметры экспериментально практически невозможно.

В связи с вышеизложенным можно сделать вывод о том, что построение математической модели, адекватно описывающей разрушение КМ под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи в широком диапазоне изменения основных параметров, является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является математическое моделирование процессов сопряженного конвективно – кондуктивного теплопереноса при локальном разрушении материала пластины под воздействием гетерогенной высокотемпературной струи при натекании на пластину КМ по направлению, совпадающему с направлением нормали к поверхности пластины. Исходя из указанной цели исследования, решались следующие задачи:

1. Определение полей скоростей газовой среды при натекании струи на пластину с учетом движения поверхности пластины.
2. Определение траекторий движения и условий взаимодействия с поверхностью КМ твердых частиц различной дисперсности и материала частиц при натекании гетерогенной струи на пластину.
3. Определение масштабов влияния параметров исследуемого процесса на интенсивность теплообмена между высокотемпературной струей и пластиной из КМ.
4. Определение масштабов влияния параметров внешнего динамического и теплового воздействия (состав дисперсный фазы в струе, скорость и температура струи, расстояние от начального сечения до пластины, возможно и другие) на характеристики разрушения КМ – тепловое состояние материала и скорость эрозии.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 Впервые поставлена и решена сопряженная задача тепломассопереноса при термомеханическом разрушении пластины из КМ в условиях взаимодействия с высокотемпературной гетерогенной струей.

2 Установлены масштабы влияния на интенсивность теплообмена между высокотемпературной струей сжимаемого вязкого газа и пластиной из КМ расстояния от начального сечения струи до поверхности пластины, скорости и температуры струи.

3 Установлено предельное значение начального радиуса струи $r_г \geq 3 \cdot 10^{-3}$ *м*, при котором воздействие осесимметричной струи может моделироваться в рамках плоской постановки задачи.
4 В широком диапазоне изменении параметров гетерогенной струи: скорости $U_з > 100$ *м/с*, плотности материала $\rho_p \geq 2700$ *кг/м*^{3} и диаметра частиц $d_p \geq 10$ *мкм* обоснованы условия взаимодействия частиц конденсированной фазы с поверхностью КМ.
5 Впервые изучены закономерности влияния параметров внешнего динамического и теплового воздействия (концентрации, состава дисперсной фазы в струе) на характеристики разрушения КМ – тепловое состояние материала и скорость эрозии.

Практическая ценность. Полученные впервые численные результаты по взаимодействию высокотемпературной гетерогенной струи с поверхностью КМ при высокой концентрации частиц могут быть использованы для совершенствования моделей прогноза термомеханического разрушения и оптимизации параметров технологических процессов: перфорации, резки и обработки различных изделий из КМ.

Полученные результаты являются основой для дальнейшего развития теории взаимодействия высокотемпературных гетерогенных струй с поверхностью КМ в задачах резки и демонтажа фундаментов и несущих конструкций оборудования ТЭС и других промышленных предприятий, обработки листового металла, бурения твердых горных пород, бетона, перфорации и резки металлов при выполнении подводных работ.

Практическая направленность исследования подтверждается актом о внедрении (соавтор – И.К. Жарова) в опытную эксплуатацию результатов научно – исследовательской разработки «Определение характеристик термомеханического разрушения конструкционных материалов при обработке гетерогенной плазменной струей» (Конструкторско-технологический Центр ТНЦ СО РАН, г. Томск, 2005 г.). Разработка предназначена для установления значений дисперсного и материального состава порошкового материала (ПН85Ю15) в плазменной струе, обеспечивающих процесс высокоскоростной гетерогенной перфорации КМ (металлы, керамика и др.).

Достоверность. Обоснованность и достоверность полученных результатов следуют из внутренних проверок используемого метода (проверка аппроксимации, сходимости решений, выполнение законов сохранения), а также из сопоставления с экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 17 конференциях различного уровня, в том числе, на Международных конференциях «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (Томск, 2002, 2004), на V Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2004), на XXVI Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2004), на XV Школе – семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева

«Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», (Калуга, 2005), на II Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», (Томск, 2005), на международной школе - конференции молодых ученых «Физика и химия наноматериалов» (Томск, 2005), на IV научной конференции «Современные методы проектирования и отработки ракетно – артиллерийского вооружения» (Саров, 2005), на XII международной научно–практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2006), на IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006), на IV Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2006).

Автор защищает:

1. Новую постановку задачи численного моделирования процесса сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при взаимодействии высокотемпературной гетерогенной струи с поверхностью КМ при термомеханического разрушении.
2. Результаты численного решения сопряженной задачи тепломассопереноса при термомеханическом разрушении конструкционного материала под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи.
3. Результаты численного анализа условий взаимодействия частиц конденсированной фазы с КМ в зависимости от скорости газовой струи, размера частиц и плотности материла частиц.
4. Результаты численного анализа влияния параметров внешнего динамического и теплового воздействия (концентрации, дисперсного и материального состава конденсированной фазы в струе) на характеристики разрушения – тепловое состояние материала и скорость эрозии.

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 23 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объем работы 116 страниц, в ней содержится 44 рисунка, список литературы включает 101 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, показана новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния теории процессов тепломассопереноса при взаимодействии высокотемпературных гетерогенных дозвуковых струй с преградами. Рассмотрены фундаментальные результаты теоретических и экспериментальных исследований. Проанализированы современные достижения в области исследования

взаимодействия струй с материалами. На основании анализа литературных источников по проблеме сделаны следующие выводы:

1. В настоящее время отсутствуют математические модели теплопереноса при разрушении КМ под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи с высокой концентрацией дисперсной фазы, позволяющие с достаточной степенью точности прогнозировать основные параметры процесса.
2. Отсутствуют математические модели позволяющие оценить влияние дисперсной фазы в струе на скорость разрушения КМ.
3. Отсутствуют математические модели, позволяющие с высокой степенью достоверности прогнозировать тепловое состояние пластины из КМ в зависимости от параметров натекающей гетерогенной струи (скорости, температуры, материала и концентрации частиц дисперсной фазы) в процессе теплоэрозионного разрушения.

<u>Во второй главе</u> представлены физическая и математическая постановка задачи сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении КМ под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи, натекающей по нормали к поверхности пластины. Область решения задачи представлена на рисунке 1.

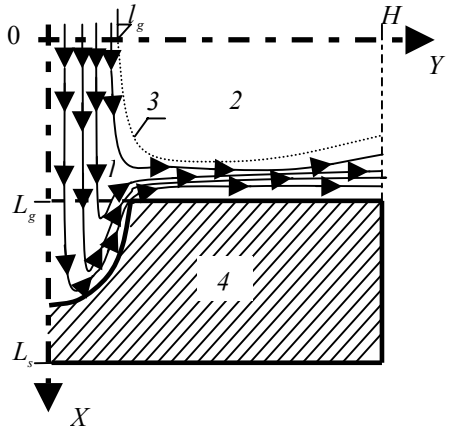


Рисунок 1 – Область решения задачи: 1 – струя; 2 – внешняя среда; 3 – граница струи; 4 – пластина

В качестве условия разрушения принято равенство касательных напряжений трения $\tau_g(y,t)$ и предела прочности материала $\sigma_{пр}(T_s)$ при соответствующей температуре:

$$\tau_g(y,t)=\sigma_{пр}(T_s). \qquad (1)$$

Гетерогенная струя рассматривалась как двухкомпонентный «псевдогаз» с эффективными характеристиками и представляла собой совокупность непрерывной (несущей) и дискретной фаз (газ – твердые частицы). Частицы являлись твердыми и взаимодействовали с поверхностью материала пластины в режиме трения-скольжения. Предполагалось, что частицы не влияют на режим течения газовой струи, не взаимодействуют между собой и в течение всего процесса не изменяют своей формы и массы.

Значения касательных напряжений трения $\tau_g(y,t)$ в (1) определялись в соответствии с общей теорией взаимодействия двухфазных струй с поверхностью материала:

$$\tau_g(y,t)=\mu_g\frac{\partial U(x,y,t)}{\partial \overline{n}},$$

или (2)

$$\tau_g(y,t) = c_f \frac{\rho_g U^2(x,y,t)}{2},$$

где μ_g – эффективный коэффициент динамической вязкости; $\bar{n}$ – нормаль к поверхности $U(x,y,t)$ – скорость струи, ρ_g – эффективная плотность, c_f – коэффициент трения.

В рамках принятой физической постановки математическая модель, описывающая динамику гетерогенной струи и тепломассоперенос в системе «струя – пластина», включает систему уравнений Навье – Стокса для сжимаемой вязкой жидкости и уравнение теплопроводности для пластины. Система уравнений замыкается начальными и граничными условиями на внешних границах области решения. На границе раздела двух подобластей записываются условия сопряжения.

Уравнения:

- движения

$$\frac{\partial \rho_g u}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g uv}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_g \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_g \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial p_g}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_g v}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g uv}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v^2}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_g \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_g \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial p_g}{\partial y}, \quad (4)$$

- неразрывности

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_g v}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

- энергии в газовой фазе

$$c_g\left(\frac{\partial \rho_g T_g}{\partial t} + \frac{\partial u \rho_g T_g}{\partial x} + \frac{\partial v \rho_g T_g}{\partial y}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y}\right), \quad (6)$$

- состояния

$$p_g = \frac{\rho_g R_g T_g}{M_g}, \quad (7)$$

- теплопроводности в твердой фазе

$$c_s \frac{\partial \rho_s T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y}\right), \quad (8)$$

- начальные условия:

при $t = 0$

$$0 \le x \le L_g, 0 \le y \le H;\ u(x,y,t) = 0,\ v(x,y,t) = 0,\ T_g(x,y,t) = T_e = const, \quad (9)$$

$$L_g < x \le L_s, 0 \le y \le H;\ T_s(x,y,t) = T_e = const, \quad (10)$$

$$0 \le y \le H;\ \xi(y,t) = L_g, \quad (11)$$

$$L_g \le x \le L_s;\ \eta(x,t) = 0, \quad (12)$$

- граничные условия:

$$x = 0, 0 \le y \le l_g;\ u(x,y,t) = U_э = const,\ v(x,y,t) = 0,\ T_g(x,y,t) = T_э, \quad (13)$$

$$x = 0, l_g < y \le H;\ \frac{\partial u(x,y,t)}{\partial x} = 0,\ v(x,y,t) = 0,\ \frac{\partial T_g(x,y,t)}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

$$0 < x < L_g, y = H;\ \frac{\partial v(x,y,t)}{\partial y} = 0,\ u(x,y,t) = 0,\ \frac{\partial T_g(x,y,t)}{\partial y} = 0, \quad (15)$$

$$0 < x < \xi(y,t), y = 0;\ \frac{\partial u(x,y,t)}{\partial y} = 0,\ v(x,y,t) = 0,\ \frac{\partial T_g(x,y,t)}{\partial y} = 0, \quad (16)$$

$$0 < y < H,\ x = \xi(y,t);\ u_s(x,y,t) = \frac{\partial \xi(y,t)}{\partial t},\ v_s(x,y,t) = \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t}, \quad (17)$$

$$\lambda_s(T_s)\frac{\partial T_s(x,y,t)}{\partial n}\bigg|_{x=\xi+0} = \lambda_g(T_g)\frac{\partial T_g(x,y,t)}{\partial n}\bigg|_{x=\xi-0} - c_s(T_s)\rho_s V_n(x,y,t)(T_s(x,y,t)\big|_{x=\xi+0} - T_0); \quad (18)$$

$$T_s(x,y,t)\big|_{x=\xi+0} = T_g(x,y,t)\big|_{x=\xi-0}.$$

$$\xi(y,t) \le x \le L_s, y = 0;\ \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y} = 0, \quad (19)$$

$$L_g \le x \le L_s, y = H;\ \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial y} = 0, \quad (20)$$

$$x = L_s, 0 \le y \le H;\ \frac{\partial T(x,y,t)}{\partial x} = 0, \quad (21)$$

Эффективные теплофизические характеристики гетерогенной струи определялись с использованием выражения:

$$\varphi_i = \frac{C_i}{\rho_i \sum_{i=1}^{I} \frac{C_i}{\rho_i}}, \quad (22)$$

где C_i, ρ_i – массовая концентрация и истинная плотность i-ой компоненты соответственно.

Эффективные теплофизические характеристики гетерогенной струи на поверхности пластины, вычислялись через коэффициент перекрытия K_P:

$$K_P = \frac{3}{2}\frac{S_p \cdot \varphi_2}{d_P}. \quad (23)$$

Тогда

$$\begin{cases} \lambda_g = \sum_{j=1}^{I} \lambda_j \varphi_j, c_g = \sum_{j=1}^{I} c_j \varphi_j, \rho_g = \sum_{j=1}^{I} \rho_j \varphi_j, 0 \le x < \eta(x,t), 0 \le y < \xi(y,t) \\ \lambda_g = \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 K_p, c_g = c_1 \varphi_1 + c_2 K_p, \rho_g = \rho_1 \varphi_2 + \rho_2 K_p, x = \eta(x,t), y = \xi(y,t) \end{cases}. \quad (24)$$

Коэффициент динамической вязкости вычислялся по формуле Эйнштейна:

$$\begin{cases} \mu_g = \mu_1(1+2,5\cdot\varphi_2), 0 \le x < \eta(x,t), 0 \le y < \xi(y,t) \\ \mu_g = \mu_1(1+2,5\cdot K_p), x = \eta(x,t), y = \xi(y,t). \end{cases} \quad (25)$$

Здесь: *x, y* – пространственные координаты; *t* – время; *u(x,y,t)*, *v(x,y,t)* – компоненты вектора скорости *U*; *T(x,y,t)* – температура; ρ – плотность; *c* – коэффициент удельной теплоемкости; λ – коэффициент теплопроводности; μ – коэффициент динамической вязкости; $R_e=R\cdot(1+\varphi_2)$ – газовая постоянная; *ξ(y,t)*, *η(x,t)* – текущие координаты поверхности пластины; V_n – линейная нормальная скорость уноса массы пластины из контрольного объема вследствие термомеханического разрушения; $\rho_s V_n$ – суммарная массовая скорость уноса материала пластины из контрольного объема; *p(x,y,t)* – давление; M_g – молекулярная масса газа. Индексы «*g», «s»* относятся к характеристикам струи и пластины соответственно.

Система (3) – (8) решалась методом контрольных объемов. Дифференциальные уравнения аппроксимировались неявной пятиточечной схемой. Конвективные члены аппроксимировались схемой против потока первого порядка. Диффузионые члены аппроксимировались центральной схемой второго порядка. Для расчета поля течения использовалась процедура SIMPLE. Система конечно-разностных уравнений решалась методом трехточечной прогонки.

Метод и алгоритм численного решения тестировались на последовательности сгущающихся сеток. Численные исследования проводились при сеточных параметрах, дальнейшее уменьшение которых не приводило к заметным отклонениям результатов вычислений. Также проводилось сравнение результатов решение задачи с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными: истечение щелевой струи в безграничное пространство, продольное обтекание пластины высокотемпературной вязкой гомогенной струей, теплообмен между вязкой высокотемпературной струей и пластиной, расположенной нормально к потоку. Получено удовлетворительное согласование с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

В третьей главе приведены результаты численного исследования процессов тепломассопереноса при локальном разрушении пластины из КМ под воздействием гетерогенной высокотемпературной струи с высокой концентрацией частиц дисперсной фазы при натекании по направлению нормали к поверхности пластины.

Рассмотрено решение задачи конвективно-кондуктивного теплоперноса при термомеханческом разрушении КМ в упрощенной постановке. На поверхности пластины записывалось граничное условие третьего рода. Моделировалось взаимодействие гетерогенной высокотемпературной струи с пластиной через коэффицент теплообмена $\alpha_Г$. Такой подход позволил оценить масштабы влияния параметров, характеризующих процесс термомеханического разрушения пластины: температурное поле, скорость уноса массы,

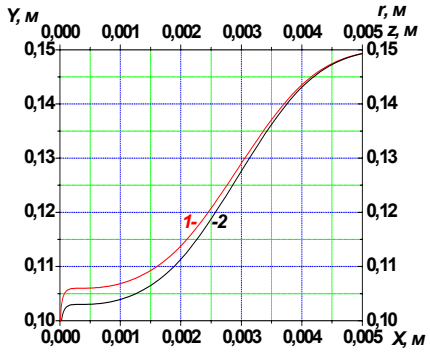


Рисунок 2 – Геометрические характеристики границы кратера при термомеханическом разрушении КМ, $r_г$=2 10^{-3} м.: 1 – решение задачи в декартовой системе координат; 2 – решение задачи в цилиндрической системе координат; t_K = 1 с

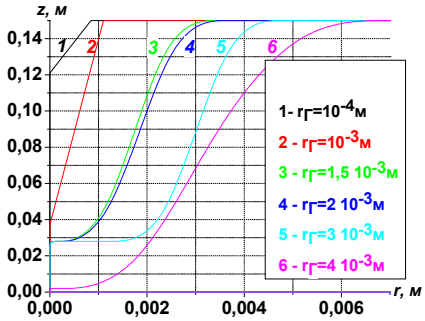


Рисунок 3 – Геометрические характеристики границы кратера при термомеханическом разрушении КМ при различном $r_г$

геометрические характеристики образующегося кратера. Для исследования влияния поперечного размера струи $r_г$ на характеристики термомеханического разрушения проводился параметрический анализ, варьировался поперечный размер струи $r_г \geq 10^{-4}$ м ... $4 \cdot 10^{-3}$ м. Установлено, что при $r_г \geq 2 \cdot 10^{-3}$ м, отличие решений в цилиндрической и декартовой системах координат по значениям рассматриваемых параметров процесса незначительно. Можно сделать вывод, что рационально моделировать исследуемый процесс в декартовой системе координат. На рисунке 2 приведены геометрические характеристики границы кратера при термомеханическом разрушении КМ, полученные на основании решения задачи в цилиндрической и декартовой системах координат. Отличие составило менее 6%.

На рисунке 3 приведены геометрические характеристики границы кратера при различных значениях $r_г = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ ... $4 \cdot 10^{-3}$ м, за одно и тоже время процесса и неизменных теплофизических характеристиках. Наблюдалась коническая форма кратера при $r_г \leq 10^{-3}$ м и форму гауссовой кривой при $r_г \geq 10^{-3}$ м. С увеличением $r_г$ увеличивались продольный и поперечный размер кратера.

Приведены результаты численного анализа динамики и теплообмена неразрушающейся непроницаемой поверхности пластины с высокотемпературной струей вязкого газа. В качестве варьируемых параметров рассматривались: расстояние от начального сечения струи до пластины ($L_g = (2{,}5...8) \cdot 10^{-2}$ м), ширина начального сечения струи ($l_g = (5...20) \cdot 10^{-3}$ м), температура ($T_з = 1000...3000$ К) и скорость ($U_з = 200...750$ м/с) струи. На основании реализации разработанной математической модели (3) – (8) представлены типичные результаты численного решения задачи: поля скоростей высокотемпературной струи вязкого газа и поля температур в системе «струя – газ». Обобщение полученных результатов о глубине прогрева конструкционного

материала (бетон) в зависимости от геометрических характеристик и параметров показало, что наибольшее влияние на прогрев пластины оказывает ее удаленность L_g от среза сопла. При $L_g = 2{,}5 \ldots 8 \cdot 10^{-2}$ *м* глубина прогрева изменялась $G_L = 16 \ldots 6 \cdot 10^{-2}$ *м* соответственно. Это объясняется изменением условий натекания струи на пластину. При уменьшении L_g интенсифицируется теплообмен натекающей высокотемпературной струи с пластиной. Менее существенно влияет на глубину прогрева пластины изменение радиуса начального сечения струи l_g: при кратном увеличении l_g глубина прогрева меняется незначительно, $G_L = 1{,}2 \div 1{,}3 \cdot 10^{-2}$ *м*. Однако с увеличением l_g увеличивается ширина области взаимодействия струи с пластиной, что приводит, в свою очередь, к увеличению ширины прогретой области в материале. Сравнение численных результатов, полученных при изменении начальной скорости и температуры в начальном сечении струи показало, что изменение этих параметров приводит к одинаковым значениям $G_L \approx 10^{-2}$ *м*.

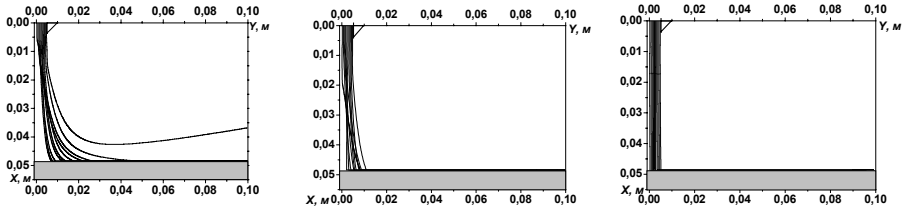
Проведен численный анализ условий взаимодействия частиц конденсированной фазы с поверхностью КМ. Анализ проводился на основании решения задачи о движении одиночной сферической частицы в газовой среде с учетом силы сопротивления:

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{3\rho_g}{4\rho_p d_p} C_D \left|U - V_p\right| \left(U - V_p\right),$$

$$t = 0, x = 0: V_p(0) = 0,$$

где V_p – скорость частицы; U – скорость струи; ρ_g и ρ_p – плотности газа и частицы соответственно; $C_D = 24 / Re + 4 / Re^{1/3}$ – коэффициент сопротивления.

Численные исследования проводились с частицами Al_2O_3 и Ni–Al при значениях варьируемых параметров струи и частиц: $U_з = (100 \div 750)$ *м/с*, $d_p = 1 \ldots 100$ *мкм*, $\rho_p \geq 2700$ *кг/м*^{3}. Анализ траекторий движения частиц позволил выделить три характерные моды (см. рисунок 5). Выбор таких мод объяснялся аналогичными траекториями движения и условиями взаимодействия частиц с поверхностью пластины для указанных интервалов диаметров частиц. Типичные траектории движения частиц каждой моды в зависимости от начального смещения относительно оси симметрии струи приведены на рисунке 5 до момента взаимодействия частицы с пластиной.



а) мода – 1, d_p=*1…10 мкм* б) мода – 2, d_p=*10…60 мкм* в) мода – 3, d_p=*60…100 мкм*

Рисунок 5 – Траектории движения одиночной сферической частицы Ni–Al в зависимости от начального смещения относительно оси симметрии

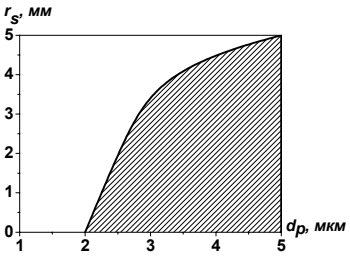


Рисунок 6 – Область взаимодействия частицы Ni–Al с поверхностью (заштрихованная область)

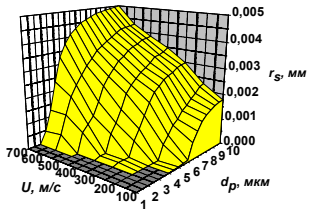


Рисунок 7 – Область взаимодействия частицы Ni–Al с пластиной

Получено, что частицы моды – 2 и моды – 3 взаимодействуют с поверхностью материала независимо от их начального смещения относительно оси симметрии струи. Область взаимодействия с поверхностью материала в зависимости от диаметра частицы d_p и удаленности от оси симметрии r_s представлена на рисунке 6.

Установлено, что с увеличением диаметра частиц значение r_s приближается к значению начального сечения струи – все частицы будут взаимодействовать с поверхностью.

Проводились численные исследования при изменении $U_з$ в начальном сечении струи. Получено, что удаленность r_s частицы от оси симметрии струи наиболее существенно влияет на условия взаимодействия частиц моды – 1 с поверхностью. Дальнейший численный анализ проводился для частиц этой моды. На рисунке 7 представлена поверхность, разделяющая области взаимодействия и невзаимодействия частиц Ni–Al с пластиной. Установлено, что частицы диаметром $d_p > 10$ *мкм* и плотностью $\rho_p \geq 2700$ *кг/м*^{3} взаимодействуют с поверхностью материала в диапазоне скоростей $U_з \geq 100$ *м/с*, причем поперечный размер области взаимодействия соизмерим с поперечным размером струи.

Иследован процесс сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении бетонной пластины под воздействием вязкой сжимаемой газовой струи, содержащей металлические частицы. Исследование проводилось при значениях параметров, соответствующих условиям экспериментов при режимах перфорации и резки стали и бетона с использованием математической модели (1) – (25). Скорость и температура в начальном сечении струи: $U_з$=750 *м/с*, $T_з$=3000 *К*. Характеристики газа, материала, частиц и внешней среды: $\mu_g = 9{,}2 \cdot 10^{-5}$ *кг/м·с*, $c_g = 1{,}3$ *кдж/кг·град*, $\lambda_g = 0{,}18$ *Вт/м·град*, $\rho_g = 0{,}41$ *кг/м*^{3}; $c_s = 0{,}84$ *кдж/кг·град*, $\lambda_s = 1{,}51$ *Вт/м·град*, $\rho_s = 2400$ *кг/м*^{3}; $\rho_p = 7980$ *кг/м*^{3}, $d_p = 10 \div 100$ *мкм*; $\mu_e = 1 \cdot 10^{-5}$ *кг/м·с*, $c_e = 1{,}2$ *кдж/кг·град*, $\lambda_e = 0{,}17$ *Вт/м·град*, $\rho_e = 1{,}2$ *кг/м*^{3}. Геометрические характеристики: $H = 0{,}1$ *м*; $L_S = 0{,}1$ *м*; $l_g = 5 \cdot 10^{-3}$*м*; $L_g = 0{,}05$ *м*.

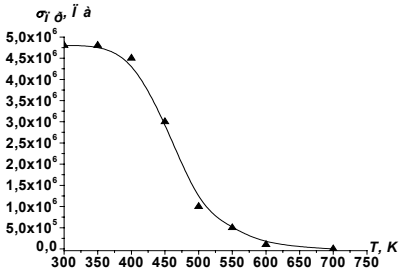


Рисунок 8 – Зависимость предела прочности бетона от температуры:
▲ – данные эксперимента;
– - аппроксимационная зависимость

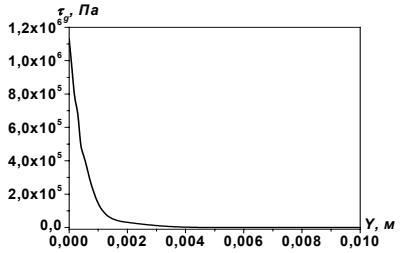


Рисунок 9 – Касательные напряжения на поверхности пластины

Температурная зависимость предела прочности бетона аппроксимирована би-сплайном по данным эксперимента и приведена на рисунке 8. Представленная зависимость соответствует изменению $\sigma_{пр}(T)$ для большинства типичных бытовых бетонов (железобетон, бетон на гравии или щебне из природного камня и т.д.).

При решении системы уравнений (3) – (8) эффективные характеристики (24), (25) рассчитывались при объемной доле частиц $\varphi_p \approx 10^{-3}$ за исключением приповерхностного слоя. На поверхности пластины концентрация частиц определялась с учетом (23).

На рисунке 9 представлены касательные напряжения трения на поверхности пластины. Наибольшие касательные напряжения трения на поверхности пластины наблюдались на оси симметрии струи.

На рисунках 10 – 12 представлены типичные результаты решения сформулированной краевой задачи с соответствующими начальными и граничными условиями за время *0,8 с*.

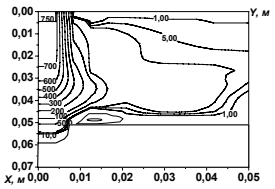


Рисунок 10 – Изотахи струи, натекающей на пластину, при термомеханическом разрушении

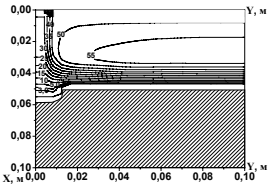


Рисунок 11– Функция тока струи, натекающей на пластину, при термомеханическом разрушении

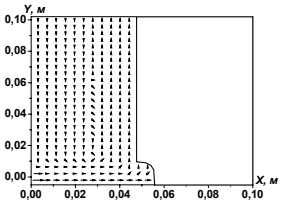


Рисунок 12 – Поле скоростей струи, натекающей на пластину, при термомеханическом разрушении

На рисунке 13 представлены результаты численных расчетов значений продольной и поперечной скорости струи при обтекании пластины и для течения в образующемся кратере в фиксированный момент времени.

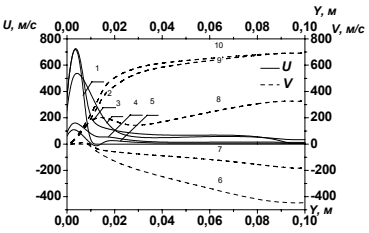


Рисунок 13 – Распределение продольной и осевой компонент скорости по сечениям *X*: *1 – u(0.001,y); 2 – u(0.017,y); 3 – u(0.038,y); 4 – u(0.052,y); 5 – u(0.054,y); 6 – v(0.001,y); 7 – v(0.017,y); 8 – v(0.038,y); 9 – v(0.052,y); 10 – v(0.054,y)*

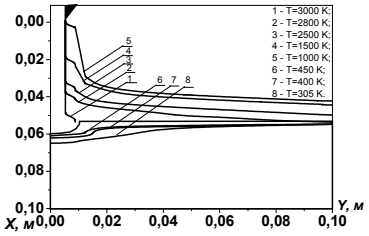


Рисунок 14 – Изотермы в системе «струя – пластина», *t=0.8 с*

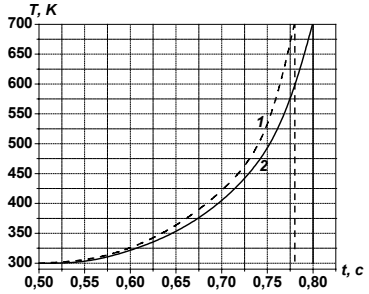


Рисунок 15 – Распределения во времени температуры материала на глубине *1 см* от нагреваемой поверхности за время *t=0.8 с*: *1* – экспериментальные данные, *2* – численный расчет

Значения продольной и поперечной составляющих скорости, на начальном участке свободно истекающей струи представлены на рисунке 13 (кривые 1, 2, 6, 7). Отрицательные значения поперечной составляющей скорости соответствуют зоне смешения воздуха и псевдогаза (кривые 6, 7 на рисунке 13). Кривые 3, 8 на рисунке 13 соответствует изменению продольной и поперечной составляющей скорости вдоль границы раздела области свободного течения и области смешения с внешней средой. Кривые на рисунке 13 (4, 5, 9, 10) соответствует значениям скоростей (продольной и поперечной) в приповерхностном слое.

На рисунке 14 показаны изотермы в системе «струя – пластина» при $t = 0.8$ *с*.

Полученные результаты показывают, что бетонная пластина интенсивно прогревается вблизи обтекаемой высокотемпературной струей поверхности. Следствием этого процесса является резкое снижение прочности материала, что и приводит к его разрушению.

Проводилось сравнение численных и экспериментальных данных (рисунок 15) о термомеханическом разрушении бетонной пластины. При численном анализе исследуемого процесса теплофизические характеристики высокотемпературной гетерогенной струи и бетонной пластины, геометрические характеристики, скорость и температура струи соответствовали характеристикам эксперимента.

Сравнение численных и экспериментальных результатов показало, что отличие температуры и скорости разрушения (показание термопары на глубине и численное значение температуры на этой же глубине) составило менее 15% и ~8% соответственно. Получено удовлетворительное соответствие численных и экспериментальных данных, что свидетельствует о достоверности результатов численного моделирования.

На основании проведенных численных исследований и сравнений полученных результатов с экспериментальными данными можно сделать вывод, что разработанная математическая модель сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении КМ под действием высокотемпературной гетерогенной струи, натекающей по направлению нормали к поверхности пластины, адекватно описывает исследуемый процесс.

Рассмотрен пример использования математической модели (3) – (21) для выбора параметров технического устройства перфорации стальных пластин высокотемпературной гетерогенной струей с высокой концентрацией дисперсной фазы. Основными параметрами, которые необходимы для реализации технологии перфорации стали, являются расстояние L_g от среза сопла газогенератора до перфорируемой пластины и длина заряда топливной композиции. На основании численного анализа получено, что существует некоторое расстояние L_g, при котором достигается максимальная глубина перфорации d стальной пластины. Это обусловлено тем, что при малых L_g частицы дисперсной фазы не успевают разогнаться до больших скоростей, соответствующих высоким значениям тепловых потоков q_w и касательных напряжений трения τ_g на обрабатываемой поверхности, а при больших L_g имеет место уменьшение скоростей движения газа и частиц с соответствующим уменьшением q_w, τ_g, V_P и d. Поэтому эрозионное воздействие частиц на пластину является слабым, а разрушение менее эффективным.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые сформулирована математическая модель сопряженного тепломассопереноса при термомеханическом разрушении КМ под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи.
2. Впервые решена нелинейная нестационарная задача тепломассопереноса при взаимодействии высокотемпературной гетерогенной струи с пластиной из КМ.
3. Численно исследовано влияние параметров внешнего динамического и теплового воздействия (дисперсного и материального состава дисперсной фазы в струе, скорость, температура, расстояние от начального сечения струи до пластины) на характеристики разрушения – тепловое состояние материала, скорость эрозии и форму образующегося кратера.
4. Установлен механизм влияния геометрических и режимных параметров (скорость и температура, расстояние от начального сечения струи до поверхности пластины, поперечный размер струи) и определена значимость влияния каждого из этих параметров на интенсивность теплообмена между газовой высокотемпературной струей и КМ.
5. Установлено, что металлические частицы плотностью $\rho_p \geq 2700$ *кг/м*^{3} и диаметром $d_p > 10$ *мкм* взаимодействуют с поверхностью материала в диапазоне скоростей $U_з \geq 100$ *м/с*.

6. Достоверность разработанной математической модели термомеханического разрушения подтверждена сравнением полученных на ее основании данных о температурном поле и скорости образования кратера в бетонной преграде, подвергающейся воздействию высокотемпературной гетерогенной струи.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Математическая модель термомеханического разрушения конструкционного материала // Тез. докл. Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (г. Томск, 15 – 20 сентября 2002 г.). – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. С. 80 – 81.
2. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Прогнозирование основных характеристик термомеханического разрушения конструкционного материала // Тез. докл. Междунар конф. по математике и механике (г Томск, 16 – 20 сентября 2003 г.). – Томск: Изд-во ТГУ, 2003. С. 140 – 141.
3. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Теплофизические аспекты разрушения конструкционных материалов под действием высокотемпературных гетерогенных струй // Мат-лы Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (г. Томск, 5 – 10 июля 2004 г.). – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. С. 93 – 94.
4. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Численное моделирование термомеханического разрушения конструкционного материала при взаимодействии с гетерогенной высокотемпературной струей // Тез. докл. XXVII Сибирского теплофизического семинара (Москва – Новосибирск, 1 – 5 октября 2004 г.). – Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2004. С. 143 – 145.
5. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Сопряженная задача о термомеханическом разрушении конструкционных материалов // XXVII Сибирский теплофизический семинар. Мат-лы сем. (Москва – Новосибирск, 1 – 5 октября 2004 г.). – Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2004. Электр. версия ISBN–5–89017–027–9. Ст. №52 (10 с.).
6. Жарова И.К., Маслов Е.А. Разрушение композиционных материалов, под воздействием высокотемпературной струи // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». (г. Томск, 5 – 7 октября 2004 г.) – Томск: Изд – во ТГУ, 2004. С. 93 – 94.
7. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Теплообмен при натекании гетерогенной плоской струи на пластину, расположенную нормально к направлению струи // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г. Томск, 5 – 7 октября 2004 г.) – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. С. 375 – 376.
8. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Влияние дисперсной фракции в высокотемпературной струе на термомеханическое разрушение

конструкционных материалов // Аэрозоли Сибири. XI Рабочая группа. Тез. докл. (Томск, 30 ноября – 3 декабря 2004 г.) – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. С. 62.
9. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Исследование условий взаимодействия частиц конденсированной фазы с поверхностью при натекании высокоскоростного гетерогенного потока // Том. ун-т. – Томск, 2005. Деп. рук ВИНИТИ 30.03.05 № 438 В2005. 16 с.
10. Маслов Е.А. Исследование течения гетерогенной струи и ее влияния на условия термомеханического разрушения конструкционного материала // Труды XV Школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (23 – 27 мая 2005 г., г. Калуга, Россия). Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. С. 245 – 248.
11. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Влияние дисперсного и материального состава конденсированной фазы в гетерогенном потоке на термомеханическое разрушение теплозащитного материала // Аннотация докладов IV научной конференции Волжского регионального центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». (г. Саров, 7 – 9 июня 2005 г.) – Саров, 2005 С. 6.
12. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Условия взаимодействия частиц конденсированной фазы с поверхностью при натекании гетерогенного потока // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т.308. № 5. С. 96 –100.
13. Маслов Е.А. Исследование высокотемпературного разрушения конструкционных материалов в кризисных ситуациях // Материалы IX Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование», Т. 1., Ч. 2. издат-во ТГПУ, 2005. 390 с. г. Томск, 25-29 апреля, С. 333-337.
14. Маслов Е.А. Прогнозирование параметров термомеханического разрушения бетонных конструкций при пожарах // Материалы IX Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и образование», Т. 1., Ч. 2. издат-во ТГПУ, 2005. 390 с. г. Томск, 25-29 апреля, С. 337-340.
15. Маслов Е.А. Двухпараметрическая модель термомеханического разрушения КМ при воздействии высокотемпературной гетерогенной струи // Физика и химия наноматериалов: Сборник материалов Международной школы-конференции молодых ученых (13 – 16 декабря 2005 г., г. Томск). – Томск: Томский государственный университет, 2005. – 912 с. С. 391 – 394.
16. Жарова И.К., Маслов Е.А. Математическое моделирование взаимодействия высокотемпературного гетерогенного потока с пластиной, расположенной нормально к направлению скорости // II Международная конференция студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных

наук», Россия, Томск, 16-20 мая 2005 г. Сборник трудов. – Томск: Изд-во Томского политехн. Ун-та, 2005, 294 с. С. 246 – 248.
17. Жарова И.К., Кравченко Ю.В., Маслов Е.А. Анализ современного состояния проблемы газодинамики и теплообмена при взаимодействии струй с преградами // ФГНУ НИИ ПМ, Томск, 2006.– 21с.ил. – Билиогр.: 60 назв. – Рус. – Деп. ВИНИТИ 31.03.06, № 356 – В2006.
18. Жарова И.К., Маслов Е.А. Условия взаимодействия и осаждение частиц конденсированной фазы при натекании гетерогенного потока на пластину // II Международная научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании», Россия, Тюмень, 24 – 26 мая 2006г. Сборник материалов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. -270 с. С. 64 – 67.
19. Маслов Е.А. Сопряженный конвективно–кондуктивный теплоперенос при термомеханическом разрушении бетонной пластины под действием высокотемпературной гетерогенной струи // XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 27 – 31 марта 2006г. Труды в 2-х т. – Томск: Издательство Томского политехн. ун-та, 2006 – Т.2.- 513с. С. 382 – 384.
20. Зырянова М.О., Маслов Е.А. Процесс осаждения частиц конденсированной фазы на поверхность пластины при натекании гетерогенного потока // XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 27 – 31 марта 2006г. Труды в 2-х т. – Томск: Издательство Томского политехн. ун-та, 2006 – Т.2.- 513с. С. 364 – 366.
21. Жарова И.К., Маслов Е.А. Взаимодействие твердых частиц с поверхностью при натекании высокоскоростной гетерогенной струи // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов Т.III (Нижний Новгород, 22-28 августа 2006). Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2006. 233с. С. 90.
22. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Термомеханическое разрушение бетонной пластины под действием высокотемпературной гетерогенной струи // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 29 – 35.
23. Жарова И.К., Кузнецов Г.В., Маслов Е.А. Численное моделирование теплопереноса при термомеханическом разрушении бетонной пластины под действием высокотемпературной гетерогенной струи // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену: В 8 томах. Т. 6. Дисперсные потоки и пористые среды. – М.: Изд-во МЭИ, 2006. С. 68 – 71.