

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ БЕТОННОЙ ПЛАСТИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУИ

### АННОТАЦИЯ

Решена плоская нестационарная задача сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении бетона под воздействием высокотемпературной гетерогенной струи вязкого сжимаемого газа, натекающей по направлению нормали к поверхности неподвижной пластины. Представлены типичные поля скоростей и температурные распределения, описывающие основные закономерности исследуемого процесса. Проведено сравнение температурного поля пластины с данными эксперимента и показано их удовлетворительное соответствие.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в технологиях перфорации, резки и обработки различных материалов являются технологии, в основе которых лежит воздействие высокотемпературных гетерогенных струи на материал [1]. Экспериментально проанализировать условия воздействия и определить параметры, характеризующие исследуемый процесс чрезвычайно трудно.

Целью данной работы является математическое моделирование процесса сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении бетонной пластины при воздействии высокотемпературной гетерогенной струи, натекающей по нормали к поверхности пластины.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается краевая задача конвективно-кондуктивного теплопереноса для области, представленной на рис. 1.

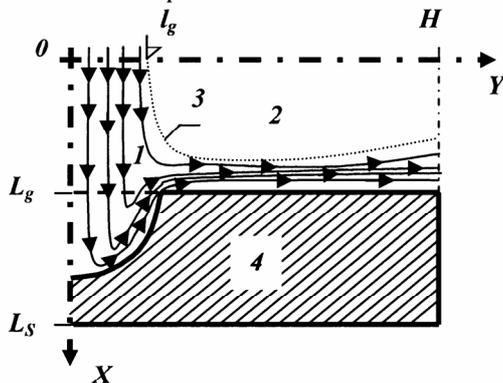


Рис. 1. Область решения задачи: 1 – струя; 2 – внешняя среда; 3 – граница струи; 4 – пластина

При моделировании процесса предполагалось, что теплофизические характеристики гетерогенной струи и материала пластины не зависят от температуры. При постановке задачи приняты следующие допущения: радиационный теплообмен на поверхности пластины не рассматривается; возможные процессы плавления и окисления материала пластины активными компонентами газовой струи не учитываются; скорость струи дозвуковая; режим течения струи ламинарный.

В такой постановке анализируемый процесс описывается системой нестационарных уравнений Навье-Стокса для газовой среды и уравнением теплопроводности для пластины [2].

Одним из важнейших и определяющих параметров, характеризующих процесс разрушения поверхности пластины, является температура прогретого («размягченного») слоя материала, т.к. предел прочности, для большинства конструкционных материалов с повышением температуры снижается. Если натекающая струя создает касательные напряжения трения, превышающие предел прочности материала при соответствующей температуре, то это приводит к термомеханическому разрушению [2].

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

$$\tau_g(y, t) = \sigma_{np}(T_S). \quad (1)$$

Гетерогенная струя представляет собой совокупность непрерывной (несущей) и дискретной фаз, таких, как газ – твердые частицы. Предполагается, что частицы не влияют на режим течения газовой струи, не взаимодействуют между собой и не изменяют своей формы и массы [3]. Частицы взаимодействуют с поверхностью материала пластины в режиме трения-скольжения [2]. Учитывая все выше сказанное, гетерогенная струя рассматривается как двухкомпонентный «псевдогаз» с эффективными характеристиками [4].

Значения касательных напряжений трения  $\tau_g(y, t)$  в (1) определяются в соответствии с общей теорией взаимодействия двухфазных струй с поверхностью материала [4]:

$$\tau_g(y, t) = c_f \rho_g U^2(x, y, t) / 2. \quad (2)$$

Система уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями для рассматриваемой задачи имеет вид.

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

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

➤ состояния

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

➤ теплопроводности

$$c_p \frac{\partial \rho_g T_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y} \right). \quad (8)$$

Начальные условия ( $t=0$ ):

$$0 \leq x \leq L_g, 0 \leq y \leq H; u(x, y, t) = 0, v(x, y, t) = 0, T_g(x, y, t) = T_c, \quad (9)$$

$$L_g < x \leq L_s, 0 \leq y \leq H; T_g(x, y, t) = T_c, \quad (10)$$

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

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

Граничные условия:

$$x=0, 0 \leq y \leq l_g; u(x, y, t) = U_s, v(x, y, t) = 0, T_g(x, y, t) = T_s, \quad (13)$$

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

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

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

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

$$\lambda_g(T_s) \frac{\partial T_g(x, y, t)}{\partial t} \Big|_{x=0} = \lambda_g(T_g) \frac{\partial T_g(x, y, t)}{\partial t} \Big|_{x=l_g} - c_s(T_s) \rho_s(x, y, t) T_s(x, y, t) \Big|_{x=0}; \quad (18)$$

$$T_g(x, y, t) \Big|_{x=0} = T_g(x, y, t) \Big|_{x=l_g}.$$

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

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

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

Эффективные теплофизические характеристики гетерогенной струи определяются с использованием выражения:

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

Эффективные теплофизические характеристики гетерогенной струи на поверхности пластины, вычисляются через коэффициент перекрытия  $K_p$  [5]:

$$K_p = \frac{3 S \cdot \varphi_2}{2 d_p}. \quad (23)$$

Тогда

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

Коэффициент динамической вязкости рассчитывается по формуле Эйнштейна [4]:

$$\begin{cases} \mu_g = \mu_1 (1 + 2,5 \cdot \varphi_2), \\ \mu_g = \mu_1 (1 + 2,5 \cdot K_p). \end{cases}. \quad (25)$$

### 3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для численного решения поставленной задачи использовался метод контрольных объемов [6].

Метод и алгоритм численного решения тестировался на последовательности сгущающихся сеток. Также проводилось сравнение результатов решения задачи с известными теоретическими решениями и экспериментальными данными: истечение щелевой струи в безграничное пространство [7], продольное обтекание пластины высокотемпературной вязкой гомогенной струей [7], теплообмен между вязкой высокотемпературной струей и пластиной, расположенной нормально к потоку [8].

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Численное исследование процесса термомеханического разрушения бетонной пластины при взаимодействии с вязкой сжимаемой газовой струей, содержащей металлические частицы, проведено при значениях параметров, соответствующих условиям экспериментов [9] при режимах перфорации и резки материалов. Скорость и температура в начальном сечении струи:  $U_s = 750$  м/с,  $T_s = 3000$  К. Характеристики струи, 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,  $\rho_g = 0,4$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_s = 0,84$  кДж/кг·град,  $\lambda_s = 1,5$  Вт/м·град,  $\rho_s = 2400$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_p = 7980$  кг/м<sup>3</sup>,  $d_p = 10 \div 100$  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<sup>3</sup>. Геометрические характеристики:  $H = 0,1$  м;  $L_s = 0,1$  м;  $l_g = 5 \cdot 10^{-3}$  м;  $L_g = 0,05$  м.

Температурная зависимость предела прочности бетона аппроксимирована би-сплайном [10] по данным [11] и приведена на рисунке 2. Представленная зависимость соответствует изменению  $\sigma_{np}(T_S)$  для большинства бетонов (железобетон, бетон на гравии или щебне из природного камня и т.д.) [11].

Наиболее интенсивное разрушение поверхности бетона будет происходить при температурах близких или выше 500 К. Основной вклад в значение касательных напряжений вносят частицы. Высокотемпературная струя, воздействуя на

материал пластины, разогревает бетон до температуры, при которой предел прочности становится равным касательным напряжениям трения потока. В результате бетон разрушается.

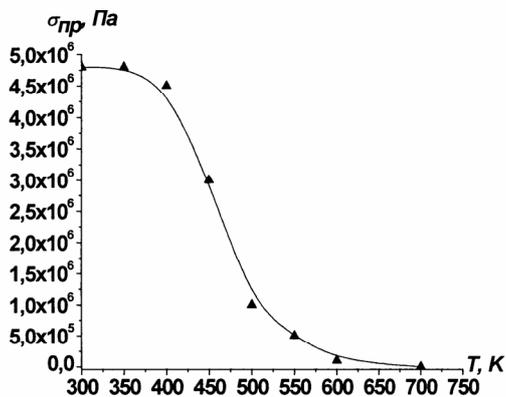


Рис. 2. Зависимость предела прочности бетона от температуры: ▲ – данные [11]; - - аппроксимационная зависимость

Ранее установлено [12], что металлические частицы, диаметр которых  $d_p = 10 \div 100$  мкм, в рассматриваемых режимах достигают поверхности, взаимодействуя с ней в режиме трения-скольжения. Протяженность области взаимодействия частиц, равна характерному поперечному размеру начального сечения струи. Объемная доля (22) частиц в струе составляет  $\varphi_p \approx 10^{-3}$ . 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 выражением (23).

По результатам численных исследований установлено, что зона наибольшего прогрева пластины в продольном направлении соизмерима с характерным поперечным размером струи. Поэтому поперечный размер образующегося кратера равен характерному поперечному размеру струи. Анализ полученных полей скорости и температуры в различные моменты времени при продвижении фронта разрушения показал, что значения скорости и температуры струи вблизи поверхности слабо изменяются со временем.

Бетон является теплоизолятором, поэтому не прогревается на значительную глубину. При этом необходимо отметить, что бетонная пластина прогревается вглубь больше, чем в поперечном направлении. Температурное поле пластины соответствует распределению величин внешних тепловых потоков, значения которых максимальны в области, поперечный размер которой соизмерим с шириной начального сечения струи. Предел прочности материала в этой области минимален и, следовательно, материал наиболее подвержен разрушению при воздействии высокотемпературной гетерогенной струи.

На рисунке 3 показаны изотермы в системе «струя – пластина» при  $t = 0.8$  с.

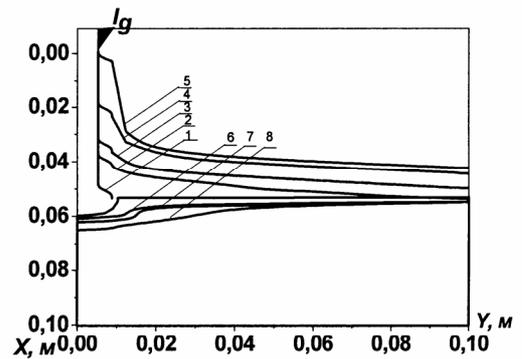


Рис. 3. Изотермы в системе «струя – пластина»,  $t=0.8$  с: 1 -  $T=3000$  K; 2 -  $T=2800$  K; 3 -  $T=2500$  K; 4 -  $T=1500$  K; 5 -  $T=1000$  K; 6 -  $T=450$  K; 7 -  $T=400$  K; 8 -  $T=305$  K.

Проводилось сравнение расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 4) о термомеханическом разрушении бетонной пластины [11]. При численной реализации исследуемого процесса теплофизические характеристики высокотемпературной гетерогенной струи и бетонной пластины, геометрические характеристики, скорость и температура струи соответствовали характеристикам эксперимента [11].

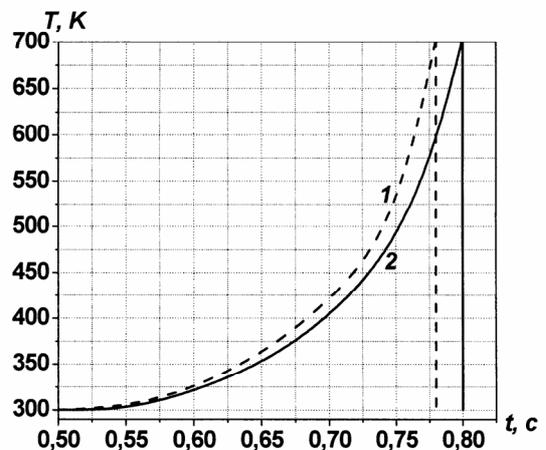


Рис. 4. Распределения во времени температуры материала на глубине 1 см от нагреваемой поверхности за время  $t=0.8$  с: 1 – экспериментальные данные, 2 – численный расчет

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. Это свидетельствует о достоверности разработанной математической модели исследуемого процесса.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численно исследован конвективно-кондуктивный теплоперенос при термомеханическом разрушении бетона. Полученные результаты характеризуют температурное поле пластины и скорость разрушения в исследуемом режиме теплопереноса.

На основании проведенного численного исследования и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными можно сделать вывод о том, что разработанная математическая модель сопряженного конвективно-кондуктивного теплопереноса при термомеханическом разрушении бетонной пластины при взаимодействии высокотемпературной гетерогенной струи, натекающей по направлению нормали к поверхности пластины, является адекватной исследуемому процессу. Использование сопряженной математической модели конвективно-кондуктивного теплопереноса для описания подобного рода явлений не приводит к большим отклонениям по значениям основных параметров (температуры и скорости разрушения пластины), которые характеризуют данный процесс.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$H$  – продольный размер пластины,  $m$ ;  
 $L_S$  – расстояние от начального сечения струи до нижней границы пластины,  $m$ ;  
 $l_g$  – ширина начального сечения струи,  $m$ ;  
 $L_g$  – расстояние от начального сечения струи до верхней границы пластины,  $m$ ;  
 $x, y$  – пространственные координаты,  $m$ ;  
 $t$  – время,  $s$ ;  
 $\tau_g$  – значение касательного напряжения,  $H/m^2$ ;  
 $\sigma_{np}$  – предел прочности материала,  $H/m^2$ ;  
 $c_f$  – коэффициент трения частицы о шероховатую поверхность;  
 $\rho$  – плотность,  $kg/m^3$ ;  
 $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $kg/m \cdot c$ ;  
 $u$  – продольная компонента вектора скорости  $U$ ,  $m/c$ ;  
 $v$  – поперечная компонента вектора скорости  $U$ ,  $m/c$ ;  
 $T$  – температура,  $K$ ;  
 $c$  – коэффициент удельной теплоемкости,  $kJ/kg \cdot grad$ ;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Wt/m \cdot grad$ ;  
 $R_e = R \cdot (1 + \varphi_2)$  – эффективная газовая постоянная,  $дж/(град \cdot моль)$ ;  
 $\xi(y, t), \eta(x, t)$  – текущие координаты поверхности пластины, определяемые из условия (1) (где  $\eta(x, t)$  – функция, обратная к  $\xi(y, t)$ ),  $m$ ;  
 $V_n$  – линейная нормальная скорость уноса массы пластины из контрольного объема вследствие термомеханического разрушения (результатирующая компонент скорости  $u, v$  определяемых из условия (17))  $m/c$ ;  
 $\rho_s V_n$  – суммарная массовая скорость уноса материала пластины из контрольного объема,  $kg/c$ ;

$p$  – давление,  $H/m^2$ ;

$\varphi_i$  – объемная доля;

$C_i$  – массовая доля  $i$ -ой компоненты;

$d_p$  – диаметр частицы,  $m^6$ ;

$M_g$  – молекулярная масса газа,  $M_g = \left( \sum_{i=1}^I \frac{m_i}{M_i} \right)^{-1}$ ,

( $m_i, M_i$  – массовая доля и молекулярная масса  $i$ -ой компоненты,  $I$  – число компонент,  $I=2, 1$  – газовая среда,  $2$  – частицы).

Индексы:

g – гетерогенная среда;

s – твердое тело.

p – частицы

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Углов В.В., Анищук В.М., Стальмошенко Е.К. Поверхностная обработка инструментальных сталей плазменными потоками квазистационарного ускорителя. Физика и химия обработки материалов. 2004. – № 6. – С. 44 – 49.
2. Маслов Е.А. Исследование течения гетерогенной струи и ее влияние на условия термомеханического разрушения // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XV Школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Т. 1. – М.: Издательство МЭИ, 2005. 420 с. С. 245 – 248.
3. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 382 с.
4. Соу С. Гидродинамика многофазных течений. М. «Мир», 1971, 536 с.
5. Полежаев Ю.В., Шипков А.А. Газодинамические испытания тепловой защиты: Справочник. – М.: Промедэк, 1992. 248 с.
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
8. Юдаев Б.Н., Михайлов М.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами. М.: Машиностроение, 1977. 208 с.
9. Абалтусов В.Е., Гага С.Г., Жарова И.К., Зотова Л.В., Кузнецов Г.В., Световещ Е.В. Экспериментальное определение основных характеристик теплообмена при теплоэрозийном разрушении материала // Прикладная механика и техническая физика. Т. 41, №2. 2000.
10. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 582 с.
11. Макагонов В.А. Бетон в условиях высокотемпературного нагрева. – М.: Стройиздат. 1979. – 84 с.
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.