

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛО- И ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОТОКОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗА

Г. Н. Исаков, А. Я. Кузин

НИИ прикладной математики и механики, 634050 Томск

Предложена физико-математическая модель процессов тепло- и массопереноса в многослойных тепло- и огнезащитных покрытиях вспучивающегося типа с распределенным по толщине влагосодержанием, позволяющая оптимизировать состав и структуру слоев в соответствии с заданным пределом огнестойкости. Приведены результаты численного моделирования процессов тепло- и массопереноса с учетом испарения, вспучивания и вдува применительно к условиям эксплуатации систем огнезащиты при тепловом воздействии от реального пожара.

Разработка и проектирование тепло- и огнезащитных покрытий на основе неорганических связующих, которые при тепловом воздействии в условиях пожара не выделяют токсических веществ, требуют значительных материальных затрат, особенно при испытании тепловых и адгезионных свойств покрытий. Для обоснования статистической достоверности результатов испытаний необходимо в каждой точке факторного пространства проводить несколько параллельных опытов и привлекать специальные планы [1] при исследовании смесей, из которых состоят новые огнезащитные [2] и теплозащитные [3] материалы.

Известно, что капиллярно-пористая структура существенно влияет на процессы тепло- и массопереноса в прогретых слоях тепло- и огнезащитных покрытий [3–5]. В частности, при больших тепловых потоках в покрытиях протекают процессы вспучивания [5], которые увеличивают толщину и пористость теплозащитного слоя, уменьшают коэффициент теплопроводности и плотность материала. Если в пористой структуре покрытия накапливается влага, что имеет место при эксплуатации покрытий в естественных условиях, то она отрицательно влияет на их адгезионные свойства, однако улучшает теплозащитные за счет затрат энергии на фазовое превращение, за счет перераспределения температурных полей и уменьшения интенсивности теплообмена покрытий с потоком высокотемпературного газа. Тепловые испытания показали [5], что капиллярно-пористые структуры необходимо формировать

таким образом, чтобы селективно перераспределить влагу, проникшую из внешней среды, и сосредоточить ее в приповерхностном слое. В результате достигается дополнительный теплозащитный эффект за счет испарения связанной воды из капиллярно-пористого тела. В связи с этим уже на ранних стадиях проектирования покрытий с заданными адгезионными и теплозащитными свойствами необходимо привлекать математические модели, с достаточной степенью адекватности описывающие физико-химические процессы в покрытиях.

В данной работе изучено влияние структуры теплозащитного покрытия при наличии в нем связанной влаги на тепло- и массообмен с потоком высокотемпературного газа (например, с пламенем) при пожарах. Проанализировано влияние вдува и различных законов изменения температуры внешнего потока и пламени на время достижения предела огнестойкости. Получена зависимость времени достижения предела огнестойкости от частоты колебаний температуры внешнего потока и пламени.

Физическая и математическая постановка задачи. Схема проведения теплового эксперимента приведена на рис. 1. Здесь пятислойная неограниченная пластина, состоящая из изолятора, металлической подложки и трехслойного тепло- и огнезащитного покрытия, нагревается с поверхности  $y = y_5(t)$  суммарным радиационно-конвективным тепловым потоком

$$q_w(t) = \alpha_w(T_{g,e} - T_w) + \sigma A_{eff}(T_{fi}^4 - T_w^4),$$

а с тыльной стороны  $y = 0$  охлаждается за счет

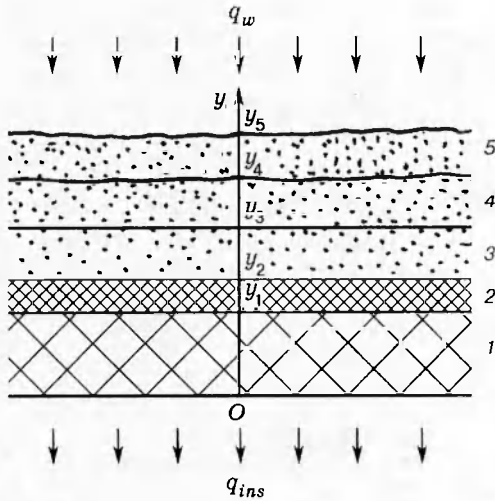


Рис. 1. Схема теплового эксперимента:  
1 — изолятор, 2 — подложка, 3-5 — трехслойное тепло- и огнезащитное покрытие

свободной конвекции

$$q_{ins}(t) = \alpha_{ins}(T_{a.ins} - T_{ins}).$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $y$  — пространственная координата;  $t$  — время;  $T$  — температура;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $A_{eff}$  — эффективная функция радиационных параметров покрытия и пламени; индексы:  $w$  — нагреваемая поверхность,  $g$  — газообразное,  $e$  — внешний поток,  $fl$  — пламя,  $ins$  — внутренняя поверхность.

В процессе нагрева слои исследуемого покрытия могут вспучиваться независимо друг от друга, в результате чего координаты внешней нагреваемой ( $y_5$ ) и внутренних ( $y_3, y_4$ ) поверхностей изменяются. Кроме того, происходит испарение влаги, находящейся в четвертом и пятом слоях. Третий слой моделируется однофазной, а четвертый и пятый слои — трехфазной пористой реагирующей средой, состоящей из твердого наполнителя, влаги и продуктов испарения влаги.

Математически процесс тепло- и массопереноса в рассматриваемой пятислойной пластине описывается системой уравнений

$$(\rho c_p)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$(\rho c_p)_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \right) - (\rho c_p)_3 U_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}; \quad (2)$$

$$(\rho c_p)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) - [(\rho c_p)_i U_i +$$

$$+ \varphi_{g,i} (\rho_g c_{p,g})_i u_{g,i}] \frac{\partial T_i}{\partial y} - Q \rho_v \varphi_{v,i} W_i; \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho_{g,i} \varphi_{g,i})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{g,i} \varphi_{g,i} U_i)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho_{g,i} \varphi_{g,i} u_{g,i})}{\partial y} = \alpha_v \rho_v \varphi_{v,i} W_i; \quad (4)$$

$$p_i = \frac{\rho_{g,i} R T_i}{M_\sigma}; \quad (5)$$

$$u_{g,i} = - \frac{k_{g,i}}{\mu_{g,i}} \frac{\partial p_i}{\partial y}, \quad k_{g,i} = k_* \varphi_{g,i}^3 (1 - \varphi_{g,i})^{-2}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi_{v,i}}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varphi_{v,i}}{\partial y} = -W_i, \quad (7)$$

$$W_i = \varphi_{v,i} k_0 \exp \left( - \frac{L}{R T_i} \right);$$

$$\frac{\partial \varphi_{s,i}}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varphi_{s,i}}{\partial y} = 0; \quad (8)$$

$$\varphi_{g,i} = 1 - \varphi_{s,i} - \varphi_{v,i}, \quad i = 4, 5, \quad (9)$$

где  $\rho$  — плотность;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $c_p$  — удельная теплоемкость;  $U$  — скорость вспучивания;  $\varphi$  — объемная доля;  $\alpha_v$  — приведенное стехиометрическое число;  $u_g$  — скорость фильтрации продуктов испарения;  $W$  — скорость испарения влаги;  $Q$  — тепловой эффект испарения;  $p$  — давление;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $M$  — молекулярная масса;  $k_g$  — коэффициент проницаемости;  $L, k_0$  — энергия активации и предэкспонент процесса испарения; индексы:  $i$  — номера слоев покрытия,  $i = 1, 5, v$  — влага,  $s$  — твердое.

Система (1)–(9) состоит из уравнений теплопроводности и сохранения энергии (1)–(3), из уравнений неразрывности (4), состояния (5) и сохранения количества движения (6) в форме линейного закона Дарси [3, 6] для продуктов испарения влаги, из уравнений сохранения массы для влаги (7), наполнителя (8) и алгебраического интеграла (9) для объемной доли продуктов испарения влаги. Коэффициент проницаемости  $k_{g,i}$  определяется по формуле Козени — Кармана [6].

Уравнения неразрывности (4) после подстановки в них плотности  $\rho_{g,i}$  из уравнения (5) и скорости фильтрации  $u_{g,i}$  из (6) преобразуются к уравнениям параболического типа для давления  $p_i$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\varphi_{g,i}}{T_i} p_i \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\varphi_{g,i} U_i}{T_i} p_i \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\varphi_{g,i} p_i k_{g,i}}{T_i \mu_{g,i}} \frac{\partial p_i}{\partial y} \right) = \frac{\alpha_v \rho_v R}{M_\sigma} \varphi_{v,i} W_i. \quad (10)$$

Система уравнений (1)–(10) дополняется начальными и граничными условиями:

$$t = 0: \quad T_i = T_i^0, \quad p_i = p_i^0, \\ \varphi_{v,i} = \varphi_{v,i}^0, \quad \varphi_{s,i} = \varphi_{s,i}^0; \quad (11)$$

$$y = 0: \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \alpha_{ins}(T_{g,ins} - T_{ins}); \quad (12)$$

$$y = y_3: \quad \frac{\partial p_4}{\partial y} = 0, \quad \varphi_{v,4} = \varphi_{v,4}^*, \quad \varphi_{s,4} = \varphi_{s,4}^*; \quad (13)$$

$$y = y_i: \quad T_i = T_{i+1}, \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y}, \quad i = 1, 4; \quad (14)$$

$$y = y_4: \quad p_4 = p_5, \\ \frac{\rho_{g,4} \varphi_{g,4} k_{g,4}}{\mu_{g,4}} \frac{\partial p_4}{\partial y} = \frac{\rho_{g,5} \varphi_{g,5} k_{g,5}}{\mu_{g,5}} \frac{\partial p_5}{\partial y}, \\ \varphi_{v,5} = \varphi_{v,5}^*, \quad \varphi_{s,5} = \varphi_{s,5}^*; \quad (15)$$

$$y = y_5: \quad \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} = \alpha_w(T_{g,e} - T_w) + \\ + \sigma A_{eff}(T_{fl}^4 - T_w^4), \quad p_5 = p_e \quad (16)$$

(индексом нуль обозначены начальные состояния).

Первое граничное условие (13) получено из (6) с привлечением условия непротекания

$$y = y_3. \quad u_{g,4} = 0.$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_w$  рассчитывался с учетом выдува продуктов испарения по формуле [3]

$$\alpha_w = \alpha_e - 0,57(M_{g,e}/M_g)^{0,7} c_{p,g}(\varphi_g \rho_g u_g)_w,$$

где  $\alpha_e = \text{const}$  — коэффициент теплоотдачи без учета выдува,  $M$  — молекулярная масса.

Приведенная математическая модель (1)–(16) служит для нахождения 17 переменных:  $T_i$  ( $i = \overline{1,5}$ );  $p_i$ ,  $\rho_{g,i}$ ,  $u_{g,i}$ ,  $\varphi_{v,i}$ ,  $\varphi_{s,i}$ ,  $\varphi_{g,i}$  ( $i = 4,5$ ).

Для замыкания математической модели (1)–(16) использовались экспериментальные данные по кривым вспучивания  $f_i(T) = 1 + \Delta h_i/h_i^0$  ( $\Delta h_i = h_i - h_i^0$  — изменение толщины слоев покрытия), начальным массовым концентрациям наполнителей  $C_{s,i}^0$  и влаги  $C_{v,i}^0$  и теплофизическим характеристикам наполнителей слоев. Последние для слоев 3–5 определялись через истинные значения и объемные доли компонентов:

$$\lambda_i = \lambda_v \varphi_{v,i} + \lambda_s \varphi_{s,i} + \lambda_g \varphi_{g,i}, \\ (\rho c_p)_i = (\rho c_p)_v \varphi_{v,i} + (\rho c_p)_s \varphi_{s,i} + (\rho c_p)_g \varphi_{g,i}.$$

Здесь  $\lambda_v$ ,  $\lambda_s$ ,  $\lambda_g$  — истинные теплопроводности, а  $(\rho c_p)_v$ ,  $(\rho c_p)_s$ ,  $(\rho c_p)_g$  — истинные объемные теплоемкости влаги, наполнителя и продуктов испарения соответственно. Переход от начальных массовых концентраций к объемным долям осуществлялся по формулам из [6]. Функция  $A_{eff}$  определялась по формуле Христиансена [4]  $A_{eff} = (\varepsilon_w^{-1} + \varepsilon_{fl}^{-1} - 1)^{-1}$ , где  $\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_{fl}$  — степени черноты поверхности покрытия и пламени.

Метод решения. Так как толщины вспучивающихся слоев покрытия в процессе нагрева увеличиваются примерно в два раза, для облегчения интегрирования системы (1)–(16) в направлении оси  $Oy$  вводились переменные Лагранжа  $\xi$  и  $\tau$  [7, 8] в виде

$$t = \tau, \quad y = \int_0^\xi f d\xi,$$

где  $f$  — безразмерная функция вспучивания.

Производные и скорость вспучивания определялись по формулам

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \tau} - f^{-1} \bar{U} \frac{\partial}{\partial \xi}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = f^{-1} \frac{\partial}{\partial \xi},$$

$$U = \int_0^\xi \frac{\partial f}{\partial \tau} d\xi.$$

В новых переменных  $\xi, \tau$  переменная область интегрирования  $\{0 \leq t \leq t_{fin}, 0 \leq y \leq y_5(t)\}$  переходит в постоянную  $D\{0 \leq \tau \leq \tau_{fin}, 0 \leq \xi \leq y_5^2\}$  (индексом *fin* обозначены конечные состояния), а уравнения в частных производных (7), (8) превращаются в обыкновенные дифференциальные уравнения, для решения которых достаточно только начальных условий (11).

Уравнения параболического типа для определения температуры и давления в переменных  $\xi, \tau$ , решались итерационно-интерполяционным методом (ИИМ) [9] насквозь во всей области  $D$ . Интерполяция экспериментальных и расчетных данных осуществлялась кубическими сплайнами [10], обладающими хорошими интерполирующими свойствами. Из-за различия физико-химических свойств материалов слоев покрытия на их границах использовались особые разностные уравнения, полученные с помощью ИИМ:

$$G_{k-1}^{j+1} \Delta \xi_k [(F_{1,k} + F_{1,k-1}) \Delta \tau - \Delta \xi_{k-1} \Delta \tau (F_{2,k-1} + \\ + 2F_{2,k})/3] + G_k^{j+1} \{-\Delta \tau [\Delta \xi_k (F_{1,k} + F_{1,k-1}) +$$

$$\begin{aligned}
& + \Delta \xi_{k-1} (F_{1,k+1} + \bar{F}_{1,k}) + \Delta \xi_{k-1} \Delta \xi_k \Delta \tau (F_{2,k-1} + \\
& \quad + 2F_{2,k} - F_{2,k+1} - 2\bar{F}_{2,k}) / 3 - \\
& - \Delta \xi_{k-1} \Delta \xi_k [\Delta \xi_{k-1} (2F_{3,k} + F_{3,k-1}) + \Delta \xi_k (F_{3,k+1} + \\
& \quad + 2\bar{F}_{3,k})] / 3 + G_{k+1}^{j+1} \Delta \xi_{k-1} [(F_{1,k+1} + \\
& \quad + F_{1,k}) \Delta \tau + \Delta \xi_k \Delta \tau (F_{2,k+1} + 2F_{2,k}) / 3] = \\
& = \Delta \xi_{k-1} \Delta \xi_k \Delta \tau [\Delta \xi_{k-1} (F_{4,k-1} + 2F_{4,k}) + \\
& \quad + \Delta \xi_k (F_{4,k+1} + 2F_{4,k})] / 3 - \\
& - \Delta \xi_{k-1} \Delta \xi_k G_k^j [\Delta \xi_{k-1} (2F_{3,k} + F_{3,k-1}) + \\
& \quad + \Delta \xi_k (F_{3,k+1} + 2\bar{F}_{3,k})] / 3. \quad (17)
\end{aligned}$$

Здесь нижний индекс  $k$  — номер узла разностной сетки, попавшего на границу слоев; верхний индекс  $j$  — номер временного слоя;  $\Delta \xi_k = \xi_{k+1} - \xi_k$  — шаг по пространственной переменной;  $\Delta \tau$  — шаг по времени;  $F_1, F_2, F_3, F_4$  — коэффициенты уравнения параболического типа общего вида

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (F_1 \frac{\partial G}{\partial \xi}) = -\bar{F}_2 \frac{\partial G}{\partial \xi} + \bar{F}_3 \frac{\partial G}{\partial \tau} + F_4,$$

определяемые постановкой задачи (1)–(16). Для уравнений теплопроводности и сохранения энергии  $G \equiv T$ , а для уравнений неразрывности  $G \equiv p$ . Черта сверху у коэффициентов  $F_1, F_2, F_3, F_4$  характеризует материал слоя по правую сторону от границы, без черты — по левую. Во внутренних точках слоев уравнение (17) упрощается и переходит в обычное уравнение разностной схемы [9]. Полученные с помощью ИИМ системы нелинейных разностных уравнений с трехдиагональными матрицами для нахождения температуры и давления на  $(j+1)$ -м временном слое рассчитывались методом прогонки [11] с итерациями по коэффициентам с заданной точностью. В качестве начального приближения брали температуру и давление с предыдущего  $j$ -го временного слоя.

**Результаты расчетов и их обсуждение.** Математическая модель многослойного испучивающегося покрытия (1)–(16) и методика расчета были апробированы на решении задачи, близкой к реальной. В качестве металлической подложки взята стальная пластина толщиной  $2,4 \cdot 10^{-3}$  м (на рис. 1 разность координат  $y_2 - y_1$ ), покрытая с тыльной стороны теплоизолятором толщиной  $2 \cdot 10^{-2}$  м (координата  $y_1$ ), а с передней стороны — трехслойным покрытием (толщины слоев  $y_3^0 - y_2 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $y_4^0 - y_3^0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $y_5^0 - y_4^0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м). Кратности испучивания  $\Delta h_i / h_i^0$  слоев 3–5 в диапазоне температур  $290 \div 650$  К менялись от 0 до 2.

Термокинетические постоянные для процесса объемного испарения влаги взяты из [4], теплофизические свойства влаги и ее продуктов испарения — из [12]. Остальные значения параметров:  $\lambda_1 = 0,08$  Вт/(м·К);  $\rho_1 = 200$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{p,1} = 1100$  Дж/(кг·К);  $\lambda_2 = 47$  Вт/(м·К);  $\rho_2 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{p,2} = 460$  Дж/(кг·К);  $\lambda_3 = 0,2$  Вт/(м·К);  $\rho_3 = 1400$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{p,3} = 1100$  Дж/(кг·К);  $\lambda_4 = \lambda_5 = 1,41$  Вт/(м·К);  $\rho_4 = \rho_5 = 2200$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{p,4} = c_{p,5} = 1300$  Дж/(кг·К);  $T_i^0 = 290$  К;  $T_{g,e} = 1100$  К;  $T_{g,ins} = 290$  К;  $\alpha_{ins} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_e = 70$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $L = 46$  кДж/моль;  $k_0 = 2 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>;  $Q = 2,56 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $R = 8,314$  Дж/моль;  $p_e = 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_w = 0,2$ ;  $\varepsilon_{fl} = 0,8$ ;  $T_{fl} = 1200$  К;  $C_{s,4}^0 = C_{s,5}^0 = 0,8$ ;  $C_{v,4}^0 = C_{v,5}^0 = 0,2$ ;  $k_* = 2 \cdot 10^{-17}$  м<sup>2</sup>.

Расчеты проведены по программе, составленной на языке ФОРТРАН для IBM PC-486. Время счета одного варианта задачи составляло  $\approx 1$  мин. При разработке программы использовали блочный принцип построения. Отдельные блоки программы, такие как решение уравнений параболического и гиперболического типов, тестировали на известных аналитических решениях [9]. Достоверность результатов проверяли также путем сравнения с результатами огневых испытаний.

На рис. 2 представлены распределения температур и давлений по толщине покрытия в различные моменты времени, полученные при  $k_* = 5 \cdot 10^{-16}$  и  $2 \cdot 10^{-17}$  м<sup>2</sup>. Из рис. 2,а следует, что наибольший перепад температур  $\Delta T$  в верхнем слое наблюдается в первые моменты времени (при  $t = 5$  мин, например,  $\Delta T \approx 250$  К). По завершении процессов испарения, испучивания и прогрева перепад температур в инертной пористой среде уменьшается и при  $t = 60$  мин составляет  $\approx 25$  К.

Профили давления по толщине покрытия вначале немонотонны. Максимумы давления соответствуют точке растекания продуктов испарения и по мере прогрева покрытия растут и смещаются от нагреваемой поверхности к поверхности  $y = y_3$ . После того, как максимумы давления оказываются на поверхности  $y = y_3$ , профили давления становятся монотонными. Давление еще некоторое время растет, а затем уменьшается вследствие уноса продуктов испарения. С ростом проницаемости покрытия качественное поведение давления в порах сохраняется. Однако вследствие увеличения скорости массового уноса немонотонность профилей

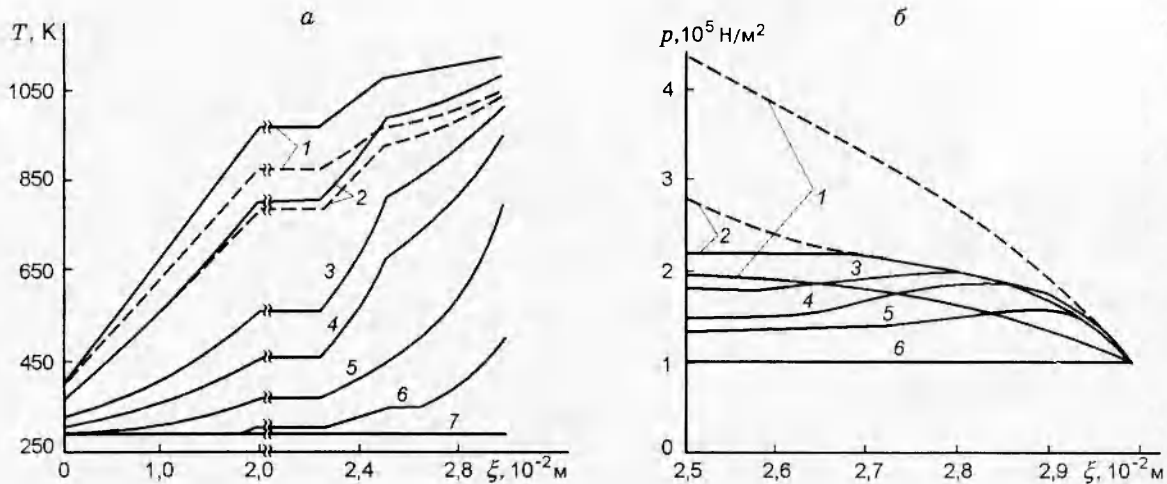


Рис. 2. Распределение температуры (а) и давления (б) по толщине покрытия без учета (сплошные линии) и с учетом (штриховые линии) вдува для  $k_* = 5 \cdot 10^{-16}$  (а) и  $2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$  (б) в различные моменты времени:

а:  $t$ , мин: 1 — 60, 2 — 30, 3 — 15, 4 — 10, 5 — 5, 6 — 1, 7 — 0; б:  $t$ , мин: 1 — 120, 2 — 30, 3 — 15, 4 — 10, 5 — 5, 6 — 0

давления ослабевают, а давление уменьшается.

Интересно проследить за динамикой роста одной из основных характеристик пожарной опасности металлоконструкций — временем достижения предела огнестойкости  $t_{fp}$  [2]. Для конструкций, испытываемых без нагрузок и покрытых огнезащитным покрытием, за  $t_{fp}$  принимается время достижения критической температуры  $T_{fp}$  материалом конструкции [2]. Например, для стали  $T_{fp} = 773 \text{ К}$  [2].

На рис. 3 приведены зависимости температуры нагреваемой и тыльной поверхностей огнезащитного покрытия от времени для различных значений начальной толщины  $y_5^0 - y_3^0$ . При увеличении толщины от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-2}$  м время достижения предела огнестойкости для стальной подложки увеличивается с 27,5 до 53,4 мин соответственно.

Обратное действие на время  $t_{fp}$  оказывает толщина теплоизоляции  $y_1$ . Так, для  $y_1 = 2 \cdot 10^{-2}$  м при толщине покрытия  $y_5^0 - y_3^0 = 5 \cdot 10^{-3}$  м имеем  $t_{fp} = 27,5$  мин (см. рис. 3). Уменьшение  $y_1$  до  $10^{-2}$  м дает увеличение  $t_{fp}$  до 29,9 мин. Увеличение  $y_1$  до  $3 \cdot 10^{-2}$  м приводит к уменьшению  $t_{fp}$  до 27,1 мин. Видно, что эти изменения весьма незначительны, поэтому влиянием толщины теплоизоляции [5] при проектировании огнезащиты металлоконструкций можно пренебречь.

Проанализируем влияние других факто-

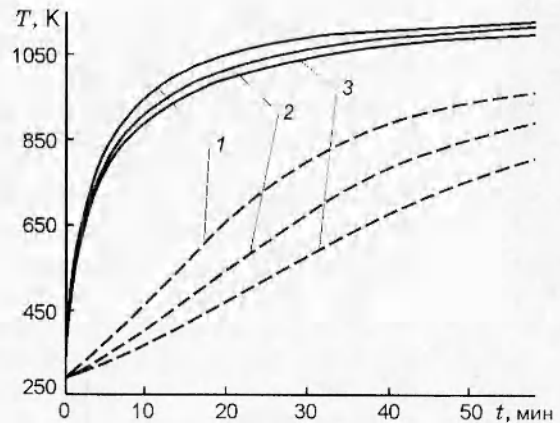


Рис. 3. Зависимости температур нагреваемой поверхности (сплошные линии) и подложки (штриховые линии) от времени для различных начальных толщин покрытия:

$y_5^0 - y_3^0$ , м: 1 —  $5 \cdot 10^{-3}$ , 2 —  $7,5 \cdot 10^{-3}$ , 3 —  $10^{-2}$

ров на огнестойкость исследуемой пятислойной конструкции. На рис. 4 показаны временные зависимости температуры поверхности  $T_w(t)$  и металлической подложки  $T_2(t)$  при различных начальных массовых концентрациях влаги  $C_{v,4}^0$  и  $C_{v,5}^0$ . Численные расчеты показали, что перераспределение влаги в 4-м и 5-м слоях при неизменной начальной массе влаги слабо влияет на время достижения предела огнестойкости. При

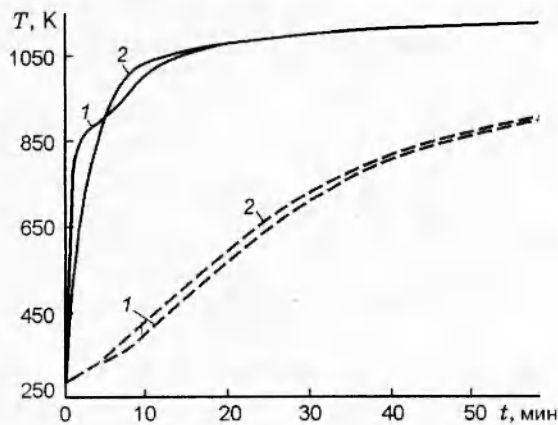


Рис. 4. Зависимости температур нагреваемой поверхности (сплошные линии) и подложки (штриховые линии) от времени для различных начальных массовых концентраций влаги в 4-м и 5-м слоях покрытия:

1 —  $C_{v,4}^0 = 0,55, C_{v,5}^0 = 0,05$ ; 2 —  $C_{v,4}^0 = 0,05, C_{v,5}^0 = 0,55$

этом наибольшей теплозащитной эффективностью обладает покрытие, в котором влага сосредоточена в нижних слоях от поверхности нагрева. Значения предела огнестойкости  $t_{fp}$  от соотношения влаги в 4-м и 5-м слоях покрытия даны в таблице.

$C_{v,4}^0$	0,55	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05
$C_{v,5}^0$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55
$t_{fp}$ , мин	36,1	36,0	35,8	35,6	35,3	34,9	34,7

На рис. 5 приведены температура нагреваемой и тыльной поверхностей огнезащитного покрытия от времени для различных законов изменения температур  $T_{g,e}$  и  $T_{fl}$ . Кривые 1 получены при  $T_{g,e} = 1100$  К,  $T_{fl} = 1200$  К. При испытаниях огнезащитных материалов на огнестойкость распространенным способом задания тепловой нагрузки является задание так называемой температуры «стандартного пожара» [2] по формуле  $T_{g,e} = T^0 + 345 \lg(8t + 1)$  (пунктирная кривая). Кривые 2 на рис. 5 получены при задании в качестве  $T_{g,e}$  температуры «стандартного пожара». Время достижения предела огнестойкости оказалось равным 31,3 мин. Таким образом, все тепловые испытания с разработанным покрытием и числен-

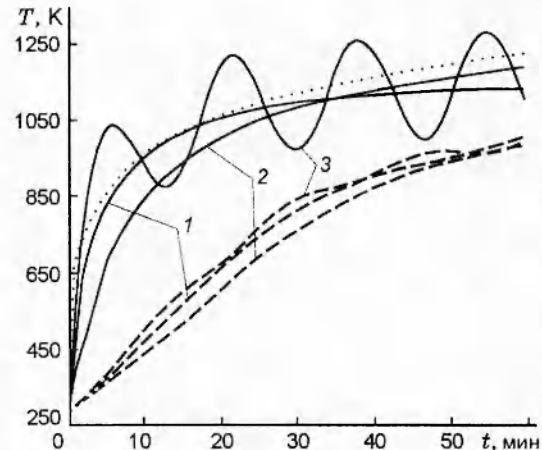


Рис. 5. Зависимости температур нагреваемой поверхности (сплошные линии) и подложки (штриховые линии) от времени для различных законов изменения температуры внешнего потока и пламени:

1 —  $T_{g,e} = 1100$  К,  $T_{fl} = 1200$  К; 2 —  $T_{g,e}$  — «стандартный пожар»,  $T_{fl} = 1200$  К; 3 —  $T_{g,e}, T_{fl}$  — синусоидальный закон; пунктирная кривая — температура «стандартного пожара», рассчитанная по [2]

ные расчеты были проведены в более жестких условиях, чем при «стандартном пожаре» [2].

Вследствие того, что реальный пожар обычно происходит в условиях переменной тепловой нагрузки, например при воздействии ветра [13], численные расчеты проведены для случая, когда температуры внешнего газового потока и пламени (вместе либо по отдельности) менялись по синусоидальному закону

$$T_{g,e}(t) = \bar{T}_{g,e} + A \sin 2\pi\nu t,$$

$$T_{fl}(t) = \bar{T}_{fl} + A \sin 2\pi\nu t.$$

Здесь  $T_{g,e}, T_{fl}$  — средние значения температур, К;  $A$  — амплитуда колебаний, К;  $\nu$  — частота колебаний,  $s^{-1}$ . Результаты расчетов для случая, когда  $T_{g,e}$  и  $T_{fl}$  менялись по синусоидальному закону, представлены кривыми 3 на рис. 5. Использованы значения параметров  $\bar{T}_{g,e} = 1100$  К,  $\bar{T}_{fl} = 1200$  К,  $A = 220$  К,  $\nu = 10^{-3} s^{-1}$ , характеризующих реальный пожар, который имитировался в полигонных условиях горением штабеля деловой древесины [13]. Как и следовало ожидать, поведение температуры нагреваемой поверхности и подложки имеет колебательный характер, амплитуда колебаний подложки ниже и запаздывает по частоте. Время достижения предела огнестойкости  $t_{fp} = 25,8$  мин.



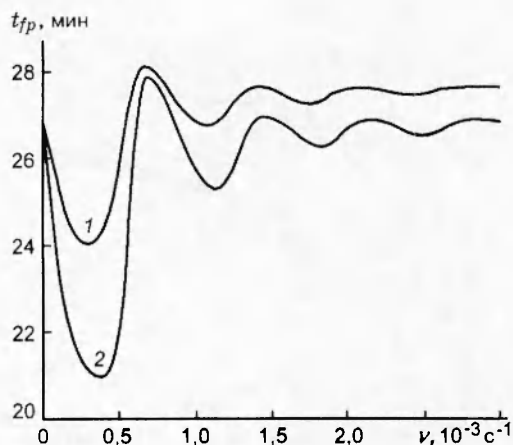


Рис. 6. Зависимости времени достижения предела огнестойкости от частоты колебаний температуры внешнего потока (1) и температуры внешнего потока и пламени (2)

На рис. 6 показана (кривая 2) зависимость времени достижения предела огнестойкости от частоты колебаний, полученная для  $T_{g,e}$  и  $T_{fl}$ , одновременно меняющихся по синусоидальному закону. Приведенная зависимость носит колебательный характер, ее амплитуда с ростом  $\nu$  затухает, а время достижения предела огнестойкости стремится к значению 26,6 мин. При частоте  $\nu = 4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  это время уменьшилось на 23,6% и составило 21 мин. Таким образом, при расчете времени достижения предела огнестойкости стальной подложки необходимо учитывать низкочастотные ( $\nu < 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ) колебания температуры внешнего потока и пламени. Зависимость  $t_{fp}(\nu)$ , когда по синусоидальному закону менялась только температура внешнего потока, а температура пламени оставалась неизменной, представлена на рис. 6 (кривая 1). Качественное поведение  $t_{fp}(\nu)$  сохранилось, однако амплитуда колебаний уменьшилась, а время  $t_{fp}$  с ростом  $\nu$  стремится к времени  $t_{fp}$  без колебаний, равному 27,5 мин.

Одно из перспективных направлений при разработке систем огнезащиты — создание покрытий с управляемым активным вдувом охладителя (например, продуктов испарения) через инертную структуру с открытыми порами [5], которая образуется по завершении процессов вспучивания и испарения. В связи с этим была проведена серия расчетов, когда вдув осуществлялся искусственно со скоростью  $u_{bl}$  с поверхности покрытия  $y = y_3$ . Математически

это значит, что с момента времени  $t = t_{bl}$  первое граничное условие (13) заменяется условием

$$-\frac{k_{g,4}}{\mu_{g,4}} \frac{\partial p_4}{\partial y} \Big|_{y=y_3} = u_{bl}.$$

Профили температуры по толщине пяти-слойной конструкции и давления в 4-м и 5-м слоях покрытия, рассчитанные с учетом вдува при различных скоростях  $u_{bl}$ , показаны на рис. 2. Обнаружено слабое влияние вдува на температуру покрытия и время  $t_{fp}$  для скорости  $u_{bl} = 10^{-6} \text{ м/с}$ . Для  $u_{bl} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$  время  $t_{fp}$  увеличивается с 27,5 до 28,2 мин, а максимальное отличие температур на подложке при  $t = 60 \text{ мин}$  составляет  $\approx 100 \text{ К}$  (см. рис. 2, а). На рис. 2, б приведены профили давления при вдуве со скоростью  $u_{bl} = 10^{-6} \text{ м/с}$  с момента времени  $t_{bl} = 19,5 \text{ мин}$ . Из рисунка следует, что наличие вдува ускоряет образование монотонных профилей давления по толщине покрытия и однонаправленное движение продуктов испарения к нагреваемой поверхности. Максимальное давление в порах при этом не превышает  $10^6 \text{ Н/м}^2$ .

Таким образом, в данной работе предложена и апробирована физико-математическая модель процессов тепло- и массопереноса в многослойных тепло- или огнезащитных покрытиях, которая позволяет учесть влагосодержание, вспучивание, испарение, фильтрацию и вдув продуктов испарения через открытые поры. Численными расчетами показано, что предел огнестойкости стальных конструкций можно увеличить за счет увеличения толщины пористой структуры покрытия, роста послойного влагосодержания, перераспределения влаги по слоям, вдува продуктов испарения влаги через открытые поры. При оценке предела огнестойкости конструкций в условиях реальных пожаров необходимо учитывать низкочастотные колебания температуры внешнего потока и пламени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976.
2. Романенков И. Г., Левитес Ф. А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991.
3. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.

4. **Исаков Г. Н.** Моделирование нестационарных процессов тепломассопереноса и воспламенения в реакционноспособных средах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1988.
5. **Исаков Г. Н., Кузин А. Я., Перевалов А. В.** Влияние структурных характеристик на нестационарный тепломассоперенос в пористых теплозащитных покрытиях // Тепломассообмен-ММФ-96 / Тепломассообмен в капиллярно-пористых телах. Минск, 1996. Т. 7. С. 113–117.
6. **Гришин А. М.** Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1973.
7. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 1.
8. **Исаков Г. Н., Кузин А. Я.** Моделирование и идентификация процессов тепломассопереноса во вспучивающихся теплозащитных материалах // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 4. С. 126–134.
9. **Гришин А. М., Кузин А. Я., Миков В. Л. и др.** Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987.
10. **Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л.** Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980.
11. **Самарский А. А., Николаев Е. С.** Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978.
12. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
13. **Исаков Г. Н., Кузин А. Я., Косоогов А. И. и др.** Некоторые результаты полигонных испытаний огнестойкости теплозащитных покрытий // Сопряженные задачи физической механики и экологии: Тез. докл. Междунар. конф. Томск, 1994. С. 85–86.

*Поступила в редакцию 25/XII 1996 г.,  
в окончательном варианте — 23/V 1997 г.*

---