

температур, скорости изменения температуры, превращений в материале и пр. Особенно важно это применять для строительных материалов, характерным к фазовым переходам и превращениям при их нагреве (пористых, минераловатных, вспучивающихся, дегидратирующих и пр.) и учете таких физико-химических процессов в так называемых «эффективных теплофизических характеристик» материалов. Определенные указанным способом эффективные теплофизические характеристики позволяют более точно оценить температурные поля в заданном диапазоне температур при оценке огнестойкости строительных конструкций.

Как показали результаты ряда проведенных исследований [1, 2], наиболее эффективных подход к решению нелинейных коэффициентных обратных задач теплообмена (для высокотемпературных нестационарных процессов свыше 1000 °С), с учетом нелинейной зависимости теплофизических характеристик от температуры состоит в применении численных методов (метода конечных разностей и конечных элементов), основанный на алгоритмах итерационной регуляризации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алифанов, О.М. Обратные задачи теплообмена / О.М. Алифанов – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
2. Бек, Д. Некорректные обратные задачи теплопроводности: пер. с англ. / Д. Бек, Б. Блакуэлл, Ч. Сент-Клэр. – М.: Мир, 1989. – 312 с.
3. Коздоба, Л.А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л.А. Коздоба, П. Г. Круковский. – Киев: Наукова думка, 1982. – 358 с.
4. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 284 с.

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ ОДНОКАМЕРНОГО СТЕКЛОПАКЕТА

Дмитриченко А.С.¹, Мамедова С.И.²

¹Беларусский государственный технологический университет

²Университет гражданской защиты МЧС Беларуси

Одной из главных тенденций в современной строительной отрасли является использование остекленных фасадов. Разрушение ограждающих светопрозрачных конструкций (СПК) может оказать существенное влияние на динамику развития пожара. При разрушении СПК и вскрытии проемов происходит резкий приток воздуха в зону горения, что приводит к возникновению объемной вспышки. Объемная вспышка, в свою очередь, способствует резкому нарастанию опасных факторов пожара.

Таким образом, актуальными являются исследования, направленные на развитие теоретических основ расчета предела огнестойкости СПК при пожаре.

Рассмотрим светопрозрачную конструкцию, состоящую из двух стеклянных панелей, разделенных воздушным зазором. Каждая стеклянная панель имеет высоту $2H$ и заключена в раму шириной d . Начало координат разместим в центре панели на краю рамы и направим ось z вдоль кромки рамы, ось y перпендикулярно кромке рамы по направлению к центру панели, ось x перпендикулярно поверхности стеклянной панели толщиной L (рис. 1).

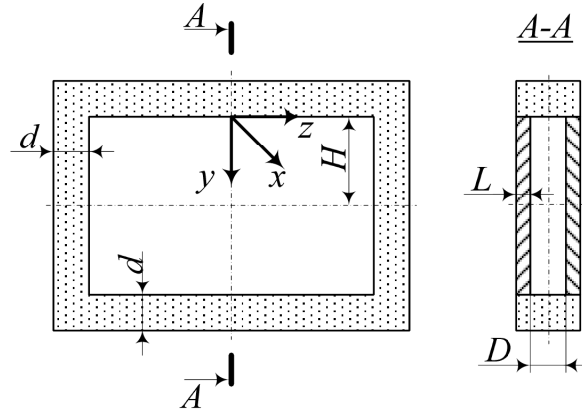


Рис 1. Однокамерный стеклопакет.

Температура в каждой из них будет определяться из решения двумерного дифференциального уравнения теплопроводности [1]. Будем считать, что до момента разрушения первой панели, обращенной в сторону пожара, она поглощает весь радиационный поток и на вторую панель он не воздействует [2].

$$\rho(T_1)c(T_1)\frac{\partial T_1(x,y,t)}{\partial t} = \lambda(T_1)\left(\frac{\partial^2 T_1(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + I(t)\frac{e^{-x/\gamma}}{\gamma}\eta(y)\eta(t-\tau_{b2}); \text{ при } 0 < x < L, -d < y < H, 0 < t < \tau_{b1}; \quad (1)$$

$$\rho(T_2)c(T_2)\frac{\partial T_2(x,y,t)}{\partial t} = \lambda(T_2)\left(\frac{\partial^2 T_2(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2(x,y,t)}{\partial y^2}\right) + I(t)\frac{e^{-x/\gamma}}{\gamma}\eta(y); \text{ при } 0 < x < L, -d < y < H, 0 < t < \tau_{b2}, \quad (2)$$

где $\rho(T)$ – плотность стекла, кг/м^3 ; $c(T)$ – теплоемкость стекла, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T_1(x, y, t)$ – температура первой панели, К ; $T_2(x, y, t)$ – температура второй панели, К ; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; x, y – пространственные координаты, м ; t – время, с ; $I(t)$ – плотность лучистого потока, поступающего на поверхность пластины, $\text{Вт}/\text{м}^2$; γ – длина затухания (величина обратная коэффициенту поглощения), м ; $\eta(y)$ – единичная функция Хевисайда ($\eta(y)=0$ при $y < 0$; $\eta(y)=1$ при $y > 0$); τ_{b2} – время разрушения наружной панели, с ; τ_{b1} время разрушения внутренней панели, с ($\tau_{b1} > \tau_{b2}$). Индексы: 1 – первая панель; 2 – вторая панель.

Начальное условие имеет вид

$$T_1(x, y, 0) = T_i; T_2(x, y, 0) = T_i; \text{ при } t = 0, \quad (3)$$

где T_i – начальная температура пластины, К .

Граничные условия имеют вид

$$-\lambda \frac{\partial T_1(0, y, t)}{\partial x} = [h_1(T_1(0, y, t) - T_{c1}(t)) +$$

$$+ \varepsilon_{np} \sigma (T_1^4(0, y, t) - T_{c1}^4(t)) \eta(y); \quad (4)$$

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T_1(L, y, t)}{\partial x} &= [h_{12}(T_2(0, y, t) - T_1(L, y, t)) + \\ &+ \varepsilon_{12} \sigma (T_2^4(0, y, t) - T_1^4(L, y, t))] \eta(y) \eta(\tau_{b2} - t) + \\ &+ [h_2(T_{c2}(t) - T_1(L, y, t)) + \\ &+ \varepsilon_{np} \sigma (T_{c2}^4(t) - T_1^4(L, y, t))] \eta(y) \eta(t - \tau_{b2}); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T_2(0, y, t)}{\partial x} &= [h_{12}(T_2(0, y, t) - T_1(L, y, t)) + \\ &+ \varepsilon_{12} \sigma (T_2^4(0, y, t) - T_1^4(L, y, t))] \eta(y); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T_2(L, y, t)}{\partial x} &= [h_2(T_{c2}(t) - T_2(L, y, t)) + \\ &+ \varepsilon_{np} \sigma (T_{c2}^4(t) - T_2^4(L, y, t))] \eta(y); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_1(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_1(x, H, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_2(x, -d, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_2(x, H, t)}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

где $h_1(T)$, $h_2(T)$ – коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхностями в окружающую среду, Вт/(м²·К); $T_{c1}(t)$, $T_{c2}(t)$ – температура окружающей среды, К; $h_{12}(T)$ – коэффициент конвективной теплоотдачи в зазоре между панелями, Вт/(м²·К); $T_i(x)$ – начальная температура пластин, К; ε_{np} – приведенная степень черноты; ε_{12} – приведенная степень черноты системы «панель – панель»; σ – постоянная Стефана – Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)); L – толщина панели, м.

При воздействии пожара на оконную панель ее открытая часть нагревается, а температура закрытой рамой части остается почти неизменной. Поэтому та часть панели, которая закрыта рамой, испытывает напряжение, за счет неравномерности прогрева по площади листа, что приводит к образованию в ней трещин и разрушению.

Будем рассматривать термонапряженное состояние пластины в несвязанной постановке (поле напряжений не влияет на поле температур). Поскольку в направлении оси z отсутствует градиент температуры, пренебрегаем зависимостью напряжений по координате z . Обозначим нормальные напряжения в направлении оси z и y , соответственно, как σ_{zz} и σ_{yy} , а сдвиговые напряжения, как σ_{zy} и σ_{yz} . Безразмерные напряжения будут иметь вид $\Psi = \sigma / \sigma_b$, здесь σ_b – критическое напряжение, вызывающее разрушение стекла. Для того, чтобы избавиться от необходимости рассматривать трехмерную задачу, проинтегрируем все величины по толщине пластины x , и будем рассматривать усредненные по толщине пластины величины. Усредненные главные напряжения, записанные в безразмерном виде по формуле (9).

$$\Sigma_{zz} = \int_0^1 \Psi_{zz} d\xi, \quad \Sigma_{yy} = \int_0^1 \Psi_{yy} d\xi, \quad \Sigma_{yz} = \Sigma_{zy} = \int_0^1 \Psi_{yz} d\xi = \int_0^1 \Psi_{zy} d\xi. \quad (9)$$

Уравнение баланса сил в направлениях z и y имеют вид по формуле (10).

$$\frac{\partial \Sigma_{zz}}{\partial \mu} + \frac{\partial \Sigma_{zy}}{\partial \zeta} = 0, \quad \frac{\partial \Sigma_{yz}}{\partial \mu} + \frac{\partial \Sigma_{yy}}{\partial \zeta} = 0. \quad (10)$$

Учитывая, что на панель не действуют никакие внешние нагрузки, а в центре панели напряжения имеют постоянное значение, запишем граничные условия в виде формулы (11).

$$\int_{\frac{d}{L}}^{\frac{H}{L}} \Sigma_{zz} d\zeta = 0, \quad \frac{\partial \Sigma_{zz}}{\partial \zeta} = 0, \quad \zeta \rightarrow \infty. \quad (11)$$

Поле напряжений и температуры связано следующим уравнением (12).

$$\frac{d^2}{d\zeta^2} [\Sigma_{zz} + \bar{\theta}] = 0. \quad (12)$$

Здесь средняя по толщине пластины безразмерная температура $\bar{\theta}$ определяется из выражения (13).

$$\frac{\bar{T} - T_i}{T_k} = \bar{\theta} = \int_0^1 \theta d\xi. \quad (13)$$

Интегрируя дважды (12) и применяя граничные условия (4) получим выражение для распределения напряжений в панели в области $-d/L < \zeta < -H/L$ получаем формулу (14).

Из (14) можно заметить, что время до разрушения определяется не температурой поверхности панели $\theta(0, \tau)$, но средней температурой $\bar{\theta}(\zeta, \tau)$.

$$\Sigma_{zz}(\zeta, \tau) = \frac{L}{H+d} \int_{\frac{d}{L}}^{\frac{H}{L}} \bar{\theta}(\zeta, \tau) d\zeta - \bar{\theta}(\zeta, \tau). \quad (14)$$

В размерном виде выражение для распределения напряжений в области $-d < y < H$ имеет вид (15).

$$\sigma_{zz}(y, t) = \frac{E\beta}{L(H+d)} \int_{-d}^H \int_0^L T(x, y, t) dx dy - \frac{E\beta}{L} \int_0^L T(x, y, t) dx. \quad (15)$$

Таким образом, из (15) мы можем определить время наступления достижения критических напряжений τ_b , оно определяется из уравнения (16).

$$\sigma_{zz}(-d, \tau_b) = \sigma_b, \quad (16)$$

где, σ_b – критические напряжения, приводящие к разрушению стекла.

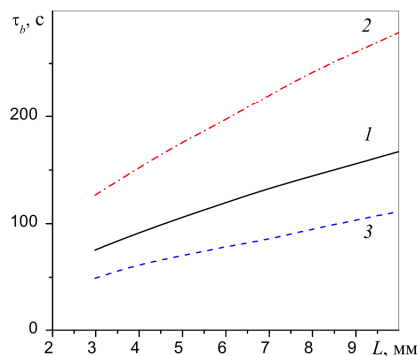
Выражение (16) можно переписать в виде (17).

$$\Delta T(-d, \tau_b) = \frac{\sigma_{zz}(-d, \tau_b)}{E\beta} = \frac{\sigma_b}{E\beta} = T_k, \quad (17)$$

где, T_k – критическая температура перегрева центральной части панели относительно ее края, приводящая к возникновению критических напряжений, вызывающих разрушение стекла.

На рис. 2 показана зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в двухслойной СПК, приводящих к ее разрушению от толщины панелей. При этом половина ширины панели $H=0,75$ м, расстояние между панелями – 2 см, интенсивность падающего излучения 5 кВт/м^2 , длина поглощения 1 мм, критическая температура 110°C .

Из приведенных зависимостей видно, что, время наступления разрушения возрастает с увеличением толщины панели. Причем вторая панель разрушается быстрее первой за счет того, что на нее воздействуют более горячие дымовые газы, так что общее время разрушение двухслойной панели превосходит время разрушения однослойной панели не в два раза, а примерно в 1,66 раз.



1 – время наступления разрушения однослойной панели; 2 – время наступления разрушения двухслойной панели; 3 – разность времен разрушения одно- и двухслойной панели

Рис. 2. Зависимость предела огнестойкости по критерию достижения критических напряжений в однослойной и двухслойной панелях, приводящих к их разрушению, от толщины панелей

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриченко, А.С. Исследование термонапряженного состояния светопрозрачной конструкции при огневом воздействии / А.С. Дмитриченко [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3. Физ.-матем. наук. – 2018. – № 2. – С. 76–81.
2. Cuzzillo, V. R. Thermal Breakage of Double-pane Glazing by Fire / V.R. Cuzzillo, P.J. Pagni // Journal of Fire Prot. Engr. – 1998. – Vol. 9, No 1. – Pp. 1 – 11.