

*А.Я. Шаршанов, к.ф.-м.н., доцент, НУГЗУ,
А.А. Чернуха, преподаватель, НУГЗУ*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГНЕЗАЩИТНОГО ДЕЙСТВИЯ ВСПУЧИВАЮЩЕГОСЯ ПОКРЫТИЯ СК-1

(представлено д-ром техн. наук Прохачем Э.Е.)

В приближении одного активно реагирующего компонента проведено математическое моделирование огнезащитного действия вспучивающегося неорганического покрытия (СК-1), нанесенного на деревянную подложку. Показана допустимость такого приближения. Для улучшения описания необходимо: 1) ввести вторую компоненту, учитывающую процесс дегидратации; 2) провести эксперименты с нанесением покрытия на инертную подложку.

Ключевые слова: математическая модель, вспучивание, температура, ксерогель.

Постановка проблемы. В связи с тем, что пожар означает существование высокотемпературных источников тепла, защита тел от нагревания остается актуальной задачей обеспечения пожарной безопасности. Распространенный способ защиты – нанесение на поверхность тела теплоизоляционных покрытий. Одним из таких покрытий является способное вспучиваться ксерогелевое неорганическое покрытие СК-1, эффективность которого была подтверждена экспериментально [1]. Целью данной работы является моделирование поведения покрытия СК-1 на основе предложенной ранее математической модели поведения вспучивающегося теплоизоляционного материала [2].

Анализ последних достижений и публикаций. Последовательное описание поведения вспучивающихся покрытий является отдельной сложной задачей. В связи с большим практическим значением рассматриваемой проблеме посвящено значительное количество работ (см. обзор [3]). Одной из задач является увязка экспериментальных данных с имеющимися теоретическими моделями. Как правило, в моделях сразу предполагается конкретный вид функциональных зависимостей с набором неопределенных коэффициентов, и задача сводится к определению численного значения этих коэффициентов. Пример такой деятельности представляет работа [4]. Указанный подход прагматичен, однако затрудняет обоснование вида зависимостей. Более последовательным является подход, опирающийся на законы сохранения. Он более последователен и позволяет хотя бы в принципе, опираясь на физические законы, как обосновывать вид зависимостей, так и оценивать сделанные упрощения. Модель такого типа [2] взята в качестве исходной в данной работе.

Постановка задачи и ее решение. В данной работе для описания поведения огнезащитного покрытия СК-1 при нагревании предлагается использовать модель, описанную в работе [2]. Основой модели является взгляд на вещество покрытия, как на смесь более простых веществ, которые при нагревании способны образовать компоненту в газовой фазе. В области температур, в которой покрытие ведет себя подобно жидкости, наличие газовой компоненты приводит к вспучиванию.

В данном предварительном исследовании предполагается несколько дополнительных упрощений:

1) состав покрытия содержит четыре компоненты - одну химически инертную (n) и одну активную компоненту (a), которая при нагревании эндотермически распадается на инертные конденсированную (c) и газовую компоненты (g);

2) вспучивание не достигает области делокализации газовой компоненты, что означает пренебрежение эффектами, связанными с потерей массы огнезащитного покрытия (как показали эксперименты, максимальная потеря массы данного покрытия достигает 20%);

3) защищаемый деревянный образец ведет себя как химически инертное вещество.

В соответствии с экспериментом [1] пространственную ситуацию можно рассматривать как одномерную. Существенная пространственная координата (x), направленная по нормали к защищаемой поверхности, отсчитывается от границы раздела дерева и защитного покрытия в сторону покрытия. В соответствии с таким взглядом состав вещества в точке с координатой x , м, в момент времени τ , с, будет задаваться набором концентраций $\rho_i(x, \tau) \equiv dm_i/dV$, где dm_i – масса i -го компонента, кг, в малом объеме dV , м³, покрытия; удельная объемная изобарная теплоемкость вещества покрытия представима в виде

$$c'_p = \sum_i \rho_i \cdot c_{p,i}, \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}, \quad (1)$$

где $c_{p,i}(T)$ – удельная массовая изобарная теплоемкость i -го компонента, Дж·кг⁻¹·К⁻¹, при абсолютной температуре $T(x, \tau)$, К. Сумма \sum_i содержит 4 слагаемых ($i = n, a, c, g$).

Концентрации $\rho_i(x, \tau)$ удовлетворяют уравнениям материального баланса

$$\frac{\partial \rho_i(x, \tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} [w(x, \tau) \cdot \rho_i(x, \tau)] = R_i, \quad (2)$$

где $R_i(T, \rho)$ – объемная плотность скорости изменения массы i -го компонента, кг·м⁻³·с⁻¹, вследствие его химических либо фазовых превращений; векторным символом ρ отображено то обстоятельство, что величина R_i может зависеть от нескольких из 4-х парциальных плот-

ностей ρ_j . В соответствии с оговоренным 1-м упрощением $R_n=0$. Из предположения о том, что реализуется только реакция распада на два компонента, следуют соотношения

$$R_g = -k_g R_a, \quad R_c = -(1-k_g) R_a, \quad (3)$$

где k_g – доля массы активного компонента, переходящая при распаде в газовую фазу. Функция, задающая скорость распада активного компонента моделируется соотношением

$$R_a = -\rho_a/\tau_a \cdot \exp(-T_a/T) \cdot [k_{T1} \cdot \text{del}(T-T_1, dT_1) + k_{T2} \cdot \text{del}(T-T_2, dT_2) + k_{T3} \cdot \text{del}(T-T_3, dT_3)], \quad (4)$$

где τ_a и $T_a, k_{T1}, k_{T2}, k_{T3}, T_1, T_2, T_3, dT_1, dT_2, dT_3$ – константы модели, символом $\text{del}(T, dT)$ обозначена уширенная дельта-функция.

$$\text{del}(z, dz) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{dz}{z^2 + (dz)^2}.$$

Величина $w(x, \tau)$ является усредненной по сечению покрытия скоростью движения компоненты, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, которая в соответствии с предположением 2 является одинаковой для всех компонент покрытия.

Система 4-х уравнений (2) дополняется соотношением энергетического баланса:

$$c'_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + w \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = -Q_R, \quad (5)$$

где $\lambda(T, \rho)$ – коэффициент теплопроводности покрытия, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; Q_R – плотность потока энтальпии реакции распада, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$, равная

$$Q_R = \sum_i h_i R_i = [h_a - (1-k_g) \cdot h_c - k_g \cdot h_g] \cdot R_a, \quad \text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (6)$$

где $h_i(T)$ – энтальпия i -го компонента в расчете на единицу его массы, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$, взятая с учетом возможных химических и фазовых превращений.

Коэффициент теплопроводности материала покрытия λ оценивается соотношением

$$\lambda(x, \tau) = C_\lambda \cdot \lambda_0 \cdot \frac{\sum_i^{(k)} \rho_i(x, \tau) \cdot v_i(x, \tau)}{\sum_i \rho_i(x, \tau) \cdot v_i(x, \tau)}. \quad (7)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности сплошного материала покрытия, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; C_λ – меньший единицы безразмерный множитель,

зависящий от структуры остова.; символ $\sum_i^{(k)}$ обозначает сумму по всем конденсированным ($i = n, a, c$) компонентам.

Величины $v_i(T) \equiv dV_i/dm_i, \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, где dV_i и dm_i – объем и масса i -го компонента в объеме dV покрытия, являются удельными объемами соответствующих компонент. В данной модели принимается, что удельные объемы конденсированных компонент постоянны, а удельный объем газовой компоненты определяется по формуле

$$v_g = \frac{R_0 \cdot T}{\mu_g \cdot P} \cdot \theta(T - T_{g.beg}) \cdot [1 - \theta(T - T_{g.end})] + \frac{R_0 \cdot T_{g.end}}{\mu_g \cdot P} \cdot \theta(T - T_{g.end}), \quad (8)$$

где $R_0 = 8314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – универсальная газовая постоянная; μ_g – молярная масса газового компонента, $\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$; $P(x, \tau)$ – давление газа, Па, которое для локализованной газовой фазы определяется диагональными компонентами тензора напряжений покрытия в месте вкрапления газовой фазы. В данной работе предполагается, что $P = \text{const} > P_0$, где P_0 – давление во внешней среде, Па.

Функция $\theta(z)$ представляет собой ступеньку от нуля к единице при переходе к положительным значениям z . Структура соотношения (8) обеспечивает выполнение уравнения состояния идеального газа для газовой компоненты в интервале температур процесса вспучивания от $T_{g.beg}$ до $T_{g.end}$ и постоянство удельного объема при более высоких температурах.

Для разрешения системы (4+1) уравнений (2), (5), необходимо знать скорости остова $w(x, \tau)$. Последняя, как показано в работе [2], в ситуации одной газовой компоненты удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} w(x, \tau) = -k_g \cdot R_a(T) \cdot v_g(T). \quad (9)$$

Граничными условиями к рассматриваемой системе уравнений (2), (5), (9) является отсутствие потоков массы компонент и непрерывность потоков энергии на границах. Напомним, что граница с защищаемой поверхностью ($x=0$ на рисунке 1) является неподвижной, а изменение координаты внешней границы покрытия (x_s) описывается уравнением

$$\frac{dx_s(\tau)}{d\tau} = w(x_s(\tau), \tau), \quad x_s(0) = L_0, \quad (10)$$

где L_0 - начальная толщина покрытия. Условие непрерывности потока энергии на этой границе имеет вид:

$$-\lambda \Big|_s \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_s = \alpha(T_f) \cdot (T \Big|_s - T_f), \quad (11)$$

где символ $\Big|_s$ - указывает на взятие величин у граничной поверхности; α – коэффициент теплоотдачи данной поверхности во внешнюю среду, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; T_f – температура среды (пламени), К.

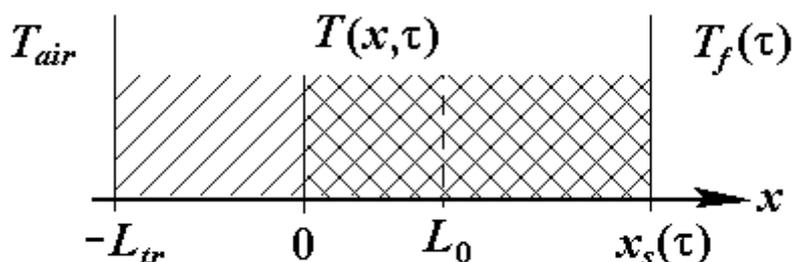


Рис. 1 – Пространственная схема прогрева: 1) $-L_{tr} < x < 0$ – защищаемая деревянная подложка; 2) $0 < x < x_s$ – защитное вспучивающееся покрытие

Условие непрерывности теплового потока на границе с деревом ($x=0$) в данной модели (инертного дерева) имеет вид:

$$-\left[\lambda_{tr} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{-0} = -\left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{+0}, \quad (12)$$

где λ_{tr} – коэффициент теплопроводности дерева, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; символ $\Big|_{\pm 0}$ - указывает на взятие величин на соответствующей стороне граничной поверхности.

Передача тепла в деревянной пластине описывается обычным уравнением нестационарной теплопроводности

$$c'_{p.tr} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{tr} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (13)$$

где $c'_{p.tr}$ - удельная объемная изобарная теплоемкость дерева, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$. Граничное условие к уравнению (13) на границе деревянной пластины с воздухом имеет вид

$$-\lambda_{tr} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{-L_{tr}+0} = \alpha(T(-L_{tr})) \cdot [T_{air} - T(-L_{tr})], \quad (14)$$

где L_{tr} – толщина деревянной пластины, м; T_{air} - температура воздуха, К.

Описанная система решалась численно при различных соответствующих экспериментах начальных толщинах защитного покрытия $L_0 = 1 \div 3$ мм, температурах пламени $t_f = 850 \div 1150^\circ\text{C}$ и фиксированной толщине деревянной пластины $L_{tr} = 15$ мм. В результате получались

и анализировались, пространственно временные зависимости температуры покрытия, коэффициента вспучивания, коэффициента теплопроводности, доли активного компонента. Полученные модельные зависимости подгонялись под экспериментальные варьированием свободных параметров.

На рисунке 2 приведена типичная модельная зависимость температур пламени t_f (°C), внешней t_s (°C) и внутренней t_w (°C) поверхности вспучивающегося покрытия. Сравнение данных кривых с температурной зависимостью, представленной в работе [1], показывает допустимость применения такой относительно простой модели для описания действия вспучивающегося покрытия СК-1.

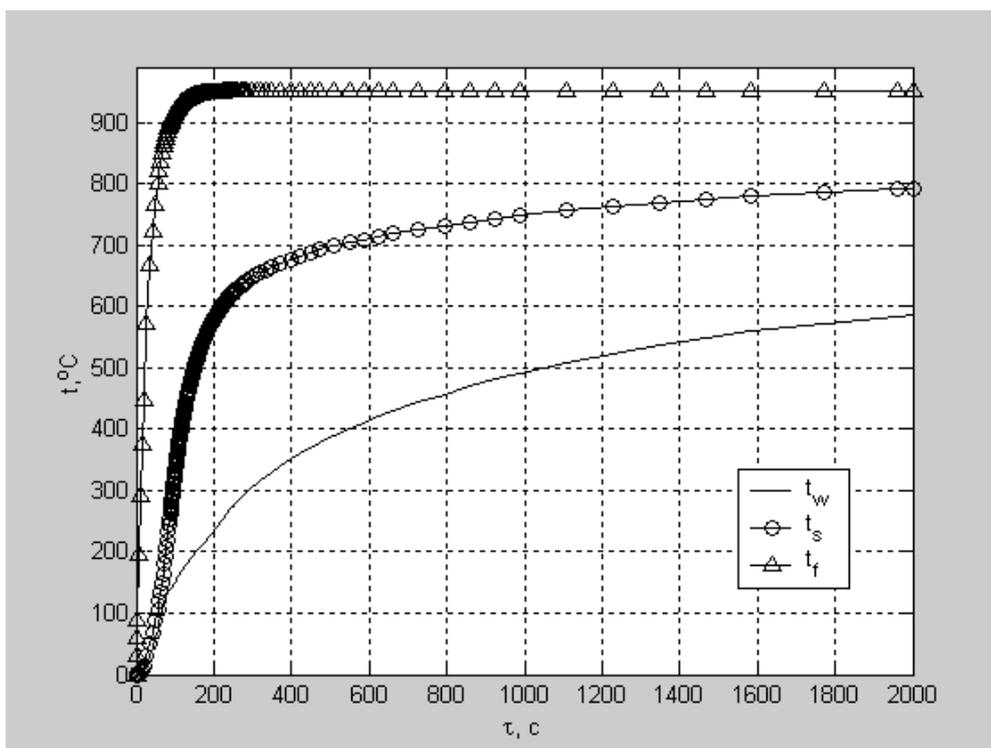


Рис. 2 – Графики модельной зависимости температур от времени огневого воздействия

Сравнение экспериментальной и модельной температурных зависимостей показывает, что для дальнейшего улучшения модели следует ее усложнить, введя дополнительно отдельную компоненту – воду, для учета процесса дегидратации. Кроме того осмотр подвергшихся огневому испытанию деревянных пластин показал, что под защитным слоем, дерево подверглось существенной деструкции. Последнее обстоятельство указывает на необходимость для задачи защиты деревянных поверхностей усложнить модель (введя в описание процесс пиролиза), а для задачи определения свойств покрытия провести эксперименты, нанося покрытие на металлические пластины (что незначительно изменит уже существующее описание).

Выводы. В приближении одного активно реагирующего компонента проведено математическое моделирование огнезащитного

действия вспучивающегося неорганического покрытия (СК-1), нанесенного на деревянную подложку. Проведено сравнение модельных результатов с экспериментальными. Показана допустимость рассмотренной модели. Из работы следует, что для улучшения описания действия защитного покрытия необходимо: 1) ввести вторую компоненту, учитывающую процесс дегидратации; 2) провести эксперименты с нанесением покрытия на инертную подложку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернуха А.А. Экспериментальное исследование температуропроводности вспучивающихся огнезащитных покрытий для древесины. / А.А. Чернуха // Проблемы пожарной безопасности. — 2011. — вып. 30. — С. 263-267.

2. Шаршанов А.Я. Математическая модель вспучивающихся огнезащитных покрытий. / А.Я. Шаршанов // Проблемы пожарной безопасности. — 2011. — вып. 30. — С. 273-280.

3. Ненахов С.А. Физико-химия вспучивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония. / С.А. Ненахов, В.П. Пименова // Пожаровзрывобезопасность. — 2010. — Т.19., №8. — С. 11-58.

4. Страхов В.Л. Математическое моделирование работы водосодержащих вспучивающихся огнезащитных покрытий. / В.Л. Страхов, А.Н. Гаращенко, В.П. Рудзинский // Пожаровзрывобезопасность. — 2003. — Т.12., №1. — С. 39-46.
nuczu.edu.ua

А.Я. Шаршанов, А.А. Чернуха

Математична моделювання вогнезахисної дії покриття СК-1, що спучується

У наближенні одного активно реагуючого компонента проведено математичне моделювання вогнезахисного дії нанесеного на дерев'яну підкладку неорганічного покриття (СК-1), що спучується. Показана допустимість такого наближення. Для поліпшення опису необхідно: 1) ввести другу компоненту, що враховує процес дегідратації, 2) провести експерименти з нанесенням покриття на інертну підкладку.

Ключові слова: математична модель, спучування, температура, ксерогеля.

A.Ya. Sharshanov, A.A. Chernukha

Mathematical modeling of fire swelling coatings SC-1

In the approximation of one active component reacting mathematical modeling of the intumescent flame retardant inorganic coating (SC-1) deposited on a wooden substrate. Shows the validity of this approximation. To improve the description of the need to: 1) to introduce the second component, taking into account the process of dehydration, and 2) to experiment with the coating on an inert substrate.

Keywords: mathematical model, swelling, temperature, xerogel.