

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ВО ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ТЕПЛОГНЕЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Г. В. Кузнецов, В. П. Рудзинский

НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете, 634050 Томск

Рассмотрены особенности механизма теплопереноса в слое вспучивающегося теплоогнезащитного материала в рамках модели, учитывающей кондуктивный, конвективный и радиационный переносы. Установлено, что радиационный теплообмен играет доминирующую роль в формировании температурного поля. Структура кокса (наличие поперечных прослоек) оказывает незначительное влияние на интенсивность и глубину прогрева материала.

Достоверная экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся теплоогнезащитных материалов (ВТОЗМ) [1] для защиты промышленных и жилых зданий от пожаров чрезвычайно затруднена. Причина заключается в непрерывном увеличении размеров «кокса» ВТОЗМ, образующегося при интенсивном нагреве. Процесс вспучивания приводит к смещению термопар относительно начального положения. Поэтому практически невозможно зарегистрировать распределение температуры T по толщине вспучивающегося материала с необходимой для анализа точностью. Кроме того, термопары, заделанные в тонкий (как правило, не более $1 \div 2$ мм) слой материала, непосредственно и эффективно, как показали эксперименты авторов данной работы, препятствуют вспучиванию ВТОЗМ в том сечении, где расположена термопара. Последнее приводит к растрескиванию кокса и кардинальному изменению условий работы таких материалов в связи с изменением механизма теплопереноса через ВТОЗМ.

В моделях [1, 2] радиационный теплоперенос в коксе ВТОЗМ учитывается введением коэффициента «лучистой» теплопроводности [2] или не учитывается вообще [1]. При этом значение коэффициента «лучистой» теплопроводности определяется из сопоставления результатов экспериментов и расчетов по модели [2].

Цель данной работы — численное исследование особенностей механизма теплопереноса в слое кокса ВТОЗМ с учетом лучистой составляющей теплового потока.

Как известно, эффективными считаются ВТОЗМ с высокими коэффициентами вспучивания (соотношение конечного и началь-

го размеров слоя материала) [1, 2]. В конечном состоянии слой полностью прококсованного ВТОЗМ должен обладать пористостью более 0,9. При этом наиболее часто встречаются структуры кокса с вытянутыми по направлению к нагреваемой поверхности сквозными цилиндрическими порами без поперечных и с поперечными прослойками. В данной работе рассматривается модель ВТОЗМ более сложной структуры — с поперечными прослойками (рис. 1). Поперечные прослойки, как можно предположить, будут препятствовать распространению излучения вглубь ВТОЗМ — к защищаемой от пожара конструкции, и такой материал будет более эффективным, чем материал со сквозными порами.

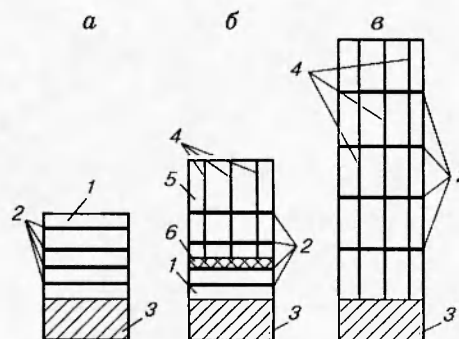


Рис. 1. Схема процесса вспучивания теплоогнезащитного материала:

а — начальное состояние, б — промежуточное, в — процесс вспучивания полностью завершен; 1 — исходный материал, 2 — прослойка, 3 — слой металла, 4 — каркас кокса ВТОЗМ, 5 — кокс, 6 — зона размягченного (вспучивающегося) материала

При постановке задачи приняты следующие допущения.

1. Задача рассматривается в одномерной постановке. Не учитывается возможность переизлучения стенок пор. Излучение распространяется только в одном направлении.

2. Продукты термического разложения исходного материала, фильтрующиеся к нагреваемой поверхности, не ослабляют радиационный поток (являются абсолютно прозрачными).

3. Термомеханические процессы вспучивания проходят без поглощения или выделения энергии.

4. Температуры газа и каркаса одинаковы.

5. Теплофизические характеристики газообразных и конденсированных продуктов термического разложения ВТОЗМ не зависят от степени деформации.

Математическую модель теплопереноса в системе «вспучивающийся теплоогнезащитный материал — слой защищаемого материала» по аналогии с [2] сформулируем следующим образом:

$$\begin{aligned}
 (c\rho)_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\
 &+ \dot{m}_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{W} \bar{Q} + \varphi \frac{\partial}{\partial x} (\bar{q}_n), \\
 c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} &- \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right], \\
 (c\rho)_{\Sigma} &= c_1 \rho_1 \varphi + c_2 \rho_2 (1 - \varphi), \\
 \lambda_{\Sigma} &= \lambda_1 \varphi + \lambda_2 (1 - \varphi), \quad \dot{m} = \int_{x_{н.р}}^{x_{к.р}} W dx, \\
 W &= \frac{\rho_0 (1 - k)}{1 + \varepsilon} \frac{d\chi}{dt}, \quad q_n = -\frac{4\sigma}{3\alpha_a} \frac{\partial}{\partial x} T^4, \\
 \rho_1 &= \frac{p_1 M}{RT}, \quad \varphi = 1 - \rho_0 [1 - \chi(1 - k)] \frac{1 - \varphi_0}{\rho_1 (1 + \varepsilon)}, \\
 \delta &= \delta_0 \left(1 + \int_0^x \varepsilon(T) dx \right), \\
 x = d + \delta: \quad -\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha (T_{в} - T_{п}) + \\
 &+ \sigma \varepsilon_{пр} (T_{в}^4 - T_{п}^4), \\
 x = d: \quad -\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} &= -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x}, \quad T_{d-0} = T_{d+0}, \\
 x = 0: \quad -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha_m (T_0 - T_{п}), \\
 t = 0: \quad T &= T_0, \quad \delta = \delta_0.
 \end{aligned}$$

Здесь ρ — плотность; c — удельная теплоемкость; t — время; T — температура; x — координата; λ — коэффициент теплопроводности; \dot{m} — массовый расход газообразных продуктов термического разложения исходного материала; W , Q — скорость и тепловой эффект реакции термического разложения; φ — пористость; q_n — лучистый тепловой поток; δ — толщина слоя ВТОЗМ; d — толщина слоя металла; c_m , ρ_m , λ_m — теплофизические характеристики металла; α — коэффициент теплоотдачи; k — коксовое число; χ — степень разложения; ε — коэффициент относительной деформации вспучивания; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты; α_a — коэффициент поглощения; p — давление; M — молекулярная масса; R — универсальная газовая постоянная. Индексы: 0 — начальное значение, 1 — газообразные продукты реакции, 2 — конденсированные, Σ — суммарные значения, п — нагреваемая поверхность материала, н.р — начало разложения, к.р — конец разложения, в — внешняя среда.

Для расчета ε использовали зависимость [2]

$$\varepsilon = \begin{cases} 0, & T < T_{н}, \\ \varepsilon_0 \frac{T - T_{н}}{T_{к} - T_{н}}, & T_{н} \leq T \leq T_{к}, \\ \varepsilon_0, & T > T_{к}. \end{cases}$$

Температуры начала и конца вспучивания ($T_{н}$ и $T_{к}$ соответственно) принимали, как и в [2], равными температуре начала газовыделения и коксования (перехода в хрупкое состояние) каркаса обугленного слоя.

Температуру внешней среды вблизи нагреваемой поверхности задавали известным [3] соотношением температуры в помещении при пожаре:

$$T_{в} = 345 \lg(8t/60 + 1) + T_0,$$

где $T_{в}$, T_0 даны в градусах Кельвина, t — в секундах.

Сформулированная математическая модель описывает процесс переноса тепла в слое ВТОЗМ за счет теплопроводности, конвекции и излучения, а в слое защищаемого от пожара материала — за счет теплопроводности.

В общем случае коксообразование разлагающихся материалов представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных химических и физических процессов. Их детальный анализ возможен только при использовании весьма

сложных моделей [4, 5], опирающихся на множество эмпирических постоянных, определение которых для вспучивающихся материалов пока методически не обеспечено. Поэтому рассматривается модель ВТОЗМ, в которой положение поперечных прослоек в цилиндрических порах кокса задается на основе конечной пористости материала φ_k и коэффициента вспучивания K_ϵ . Для типичных ВТОЗМ [1, 2] $\varphi_k \approx 0,9$ и $K_\epsilon \approx 5$. Исходя из этих значений параметров предполагалось, что при вспучивании слоя материала любой толщины каждый миллиметр ВТОЗМ образует одну поперечную прослойку кокса толщиной 0,1 мм.

Анализ проведен для слоя материала с начальной толщиной 4 мм. Соответственно при полном завершении процесса термического разложения исходного ВТОЗМ образовывалось четыре прослойки толщиной 0,1 мм каждая. Принималось, что прослойки обладают низкой пористостью ($\varphi = 0,1$), но достаточной для фильтрации газообразных продуктов термического разложения исходного материала к поверхности нагрева. Предполагалось также, что в начальный момент времени прослойки равномерно распределены по толщине ВТОЗМ и по мере вспучивания материала перемещаются навстречу потоку тепла со скоростью, значение которой определяется внешними условиями и свойствами ВТОЗМ.

Принципиальная схема рассматриваемого процесса приведена на рис. 1. Материал прогревается под действием внешнего источника энергии (например, пламени) с заданными параметрами, и при достижении температуры начала разложения начинается термическое разложение ВТОЗМ. При достижении условия начала вспучивания ($T = T_n$) слой материала увеличивается в соответствии со значением относительной деформации ϵ , достигнутым к данному моменту времени. В материале поперечной прослойки при нагреве не происходит физико-химических превращений. Каждая прослойка по мере «разбухания» материала последовательно смещается к нагреваемой поверхности. По мере продвижения фронта начала термического разложения вглубь материала образуется структура, показанная на рис. 1,б. После завершения процесса деструкции по всей толщине ВТОЗМ образуется кокс с четырьмя поперечными прослойками (см. рис. 1,в).

Принятая схема является упрощенной, но она отражает весь комплекс физических и химических процессов, протекающих во вспучи-

вающихся материалах при интенсивном нагреве. Увеличение или уменьшение числа поперечных прослоек не меняет физической модели теплопереноса во ВТОЗМ.

Решение сформулированной задачи проведено методом конечных разностей [6]. Параметры применявшейся итерационной неявной четырехточечной схемы выбраны исходя из условий обеспечения аппроксимации не ниже $O(h^2)$ для всех узлов разностной сетки как внутри, так и на границах области решения. Размеры шага h по пространственной координате x определены из условия попадания не менее четырех узлов в одну поперечную прослойку и в процессе решения не менялись. Количество узлов разностной сетки увеличивалось по мере вспучивания. Значения температуры в узлах новой сетки на каждом шаге по времени определяли интерполяцией по значениям T в узлах старой сетки. Зона деформации ВТОЗМ была ограничена интервалом температур от T_n до T_k . Границы зоны деформации по мере роста температуры смещались от поверхности нагрева вниз.

Численные исследования выполнены для различных режимов теплообмена, параметров и характеристик ВТОЗМ, толщин материала и количества поперечных прослоек. В качестве иллюстраций приведены результаты типичных расчетов при следующих значениях постоянных и параметров: $c_1 = 1060$ Дж/(кг · К); $\rho_2 = 1220$ кг/м³; $\lambda_2 = 4,7$ Вт/(м · К); $c_m = 460$ Дж/(кг · К); $\rho_m = 7800$ кг/м³; $\lambda_m = 45$ Вт/(м · К); $Q = 2 \cdot 10^5$ Дж/кг; $k = 0,45$; $\alpha_a = 2$ м⁻¹; $\alpha = 25$ Вт/(м² · К); $\delta_0 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $T_0 = 300$ К; $\epsilon_n = 0,9$; $\epsilon_b = 0,82$; $T_n = 373$ К; $T_k = 873$ К; $\alpha_m = 6$ Вт/(м² · К); $\epsilon_0 = 4$. При расчетах давление в коксе принимали равным давлению внешней среды (10^5 Па). Значение степени разложения $\chi(T)$, как и в [2], задавали таблично по экспериментальным данным [2].

Распределения температуры по толщине ВТОЗМ приведены на рис. 2, а на рис. 3 показаны зависимости температуры на границе «ВТОЗМ — защищаемая конструкция» ($T_{гр}$) от времени для вариантов с поперечными прослойками и без них. Анализ полученных результатов показывает, что в условиях, когда газообразные продукты разложения ВТОЗМ абсолютно прозрачны, вспучивание не приводит к снижению температуры защищаемой конструкции (см. рис. 2). Наличие поперечных прослоек также практически не влияет на величину температуры $T_{гр}$. При $t < 10^3$ с раз-

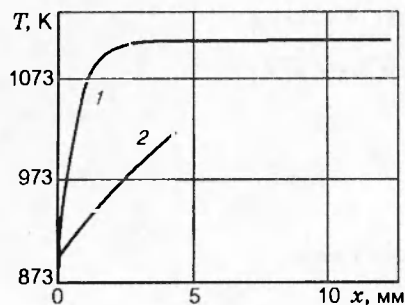


Рис. 2. Распределение температуры по координате x в момент времени $t = 1800$ с:

1 — материал всучивается, 2 — всучивание отсутствует

ность $T_{гр}$ для двух рассматриваемых структур кокса составляет всего $20 \div 30$ К при абсолютных значениях $T_{гр}$ до 800 К, а при $t > 10^3$ с — не превышает 10 К. Как видно, наличие поперечных прослоек не приводит к существенному снижению температуры защищаемой от пожаров конструкции.

Необходимо отметить, что поперечные прослойки малой толщины в коксе ВТОЗМ практически не влияют на интенсивность теплопередачи к защищаемой конструкции. Численный анализ показал, что перепад температур по толщине прослойки в типичных режимах теплообмена не превышает 3 К. Примечательно, что всучивающийся материал за счет радиационного теплопереноса в порах прогревается на очень большую глубину до значения, близкого к $T_{п}$ (см. рис. 3). Фактически материал с очень высокой пористостью ($\varphi \approx 0,9$) в рассмотренных условиях, характерных для пожаров в помещениях, не выполняет функцию теплозащитного материала.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о доминирующей роли радиационного механизма переноса тепла в формировании температурного поля всучивающихся теплоогнезащитных материалов с высокой пористостью. Оценку параметров и характеристик

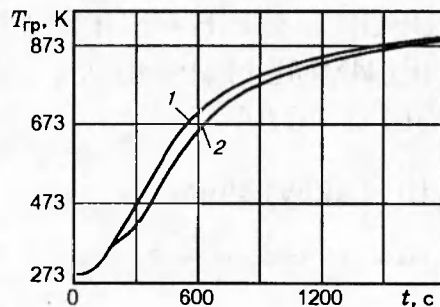


Рис. 3. Зависимость температуры на границе ВТОЗМ — металл от времени:

1 — поперечные прослойки присутствуют, 2 — отсутствуют

таких материалов, как следует из проведенного анализа, надо проводить с максимально полным учетом радиационного теплообмена в коксе ВТОЗМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаков Г. Н., Кузин А. Я. Моделирование и идентификация процессов тепломассопереноса во всучивающихся теплозащитных материалах // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 4. С. 126–134.
2. Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П. Расчет нестационарного прогрева многослойных огнезащитных конструкций // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. 1994. Вып. 1–2 (109–110).
3. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. М.: Стройиздат, 1988.
4. Асеева Р. М., Заиков Г. Е. Горение полимерных материалов. М.: Наука, 1981.
5. Теснер П. А., Кнорре В. Т. Аналитическое описание процесса образования сажевых частиц при термическом разложении углеводородов // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 3. С. 386–390.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.

Поступила в редакцию 23/IV 1997 г.