

УДК 678.067.7:536.4

## ТЕПЛОПЕРЕНОС ВО ВСПУЧИВАЮЩИХСЯ ТЕПЛОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Г. В. Кузнецов, В. П. Рудзинский

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
при Томском государственном университете, 634050 Томск

Проведены численные исследования совместно протекающих физико-химических и теплофизических процессов во вспучивающихся теплоогнезащитных покрытиях с использованием модели, в основе которой лежит гипотеза об абсолютной прозрачности газообразных продуктов термического разложения исходного материала. Установлено, что при полном учете радиационного механизма переноса тепла в слое кокса вспучивающегося покрытия значения температуры на поверхности защищаемой конструкции практически равны температуре, достигаемой на этой поверхности при использовании невспучивающегося покрытия.

Вспучивающиеся теплоогнезащитные покрытия (ВТОЗП) считаются перспективными для защиты различных объектов промышленного и социального назначения от пожаров [1, 2]. При анализе эффективности таких покрытий используется модель, в уравнениях которой содержится коэффициент «лучистой теплопроводности» [1]. Этот коэффициент записывается обычно с использованием известного приближения Росселанда [3] через постоянную  $\gamma$ , которая не может быть получена только из экспериментов, а определяется из сопоставления результатов расчетов по модели [1] и опытных данных. При такой методике определения  $\gamma$  модель [1] не является замкнутой и параметр  $\gamma$  служит для согласования теории и эксперимента.

В настоящей работе выполнен численный анализ основных закономерностей переноса тепла во вспучивающихся теплоогнезащитных покрытиях на основе модели ВТОЗП со сквозными порами и абсолютно прозрачной средой в них.

Рассматривается задача смешанного теплопереноса в слое кокса ВТОЗП с открытыми сквозными порами. Материалы с такой пористостью широко распространены [1]. На рис. 1 приведена схема рассматриваемого процесса. При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

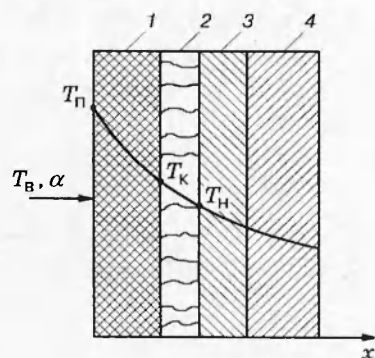


Рис. 1. Схема прогрева вспучивающегося теплоогнезащитного покрытия:

1 — кокс; 2 — слой размягченного материала; 3 — ВТОЗП в исходном состоянии; 4 — слой металла (защищаемая конструкция)

- поры открыты;
- глубина проникновения излучения определяется пористостью;
- не учитывается возможность переизлучения стенок пор;
- радиационные свойства материала каркаса пор не зависят от степени деформации (вспучивания) ВТОЗП;
- продукты термического разложения исходного материала, фильтрующиеся к поверхности, не ослабляют радиационный поток;
- термомеханические процессы вспучивания протекают без выделения или поглощения энергии;
- скорость вспучивания и коэффициент деформации ВТОЗП известны;
- температуры газа и каркаса равны;
- задача рассматривается в рамках приближения Росселанда для сред с большой оптической плотностью.

Принятые допущения не накладывают больших ограничений на диапазон изменения параметров, определяющих интенсивность переноса тепла в слое кокса ВТОЗП с высокой пористостью (до 0,95). В такой постановке из рассмотрения исключается ряд второстепенных факторов, для учета которых необходимы экспериментальные данные, а их получение для большинства ВТОЗП невозможно.

Уравнение энергии, описывающее процесс переноса тепла во вспучиваемом теплоогнезащитном материале толщиной  $\delta$ , по аналогии с [1, 2, 4–6] записано в виде

$$(c\rho)_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \dot{m}_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial x} + WQ + \varphi \frac{\partial}{\partial x} (q_{\text{л}}), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость;  $t$  — время;  $T$  — температура;  $x$  — координата;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\dot{m}$  — массовый расход газообразных продуктов термического разложения исходного материала;  $W$  и  $Q$  — скорость и тепловой эффект реакции термического разложения;  $\varphi$  — пористость;  $q_{\text{л}}$  — лучистый тепловой поток.

Значения  $(c\rho)_{\Sigma}$ ,  $\lambda_{\Sigma}$ ,  $\dot{m}$ ,  $W$ ,  $q_{\text{л}}$ ,  $\varphi$ ,  $\delta$  определяются из следующих выражений:

$$(c\rho)_{\Sigma} = c_1 \rho_1 \varphi + c_2 \rho_2 (1 - \varphi), \quad \lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 (1 - \varphi), \quad \dot{m} = \int_{x_{\text{н.р}}}^{x_{\text{к.р}}} W dx, \quad (2)$$

$$W = \frac{\rho_0 (1 - k)}{1 + \varepsilon} \frac{\partial \chi}{\partial t}, \quad q_{\text{л}} = -\frac{4\sigma}{3\alpha_p} \frac{\partial}{\partial x} T^4, \quad \varphi = 1 - \rho_0 [1 - \chi(1 - k)] (1 - \varphi_0) / [\rho_2 (1 + \varepsilon)];$$

$$\delta = L + \int_0^t \varepsilon(t) [\dot{x}_{\text{к}}(t) - \dot{x}_{\text{н}}(t)] dt, \quad (3)$$

где  $k$  — коксовое число;  $\chi$  — степень разложения [1];  $\varepsilon$  — коэффициент относительной деформации;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $\alpha_p$  — коэффициент поглощения;  $\dot{x}_{\text{н}}$ ,  $\dot{x}_{\text{к}}$  — скорости перемещения изотерм начала и конца вспучивания;  $L$  — начальная толщина покрытия; индексы обозначают: 0 — начальное значение, н. р и к. р — начало и конец разложения, 1 и 2 — газообразные и конденсированные продукты реакции,  $\Sigma$  — суммарные значения.

Для упрощения анализа рассматривается однослойное покрытие начальной толщины  $L$ , защищающее металлическую конструкцию толщиной  $d$ , для которой записывается уравнение теплопроводности в виде

$$c_{\text{м}} \rho_{\text{м}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_{\text{м}} \frac{\partial T}{\partial x} \right]. \quad (4)$$

Задача решалась при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{aligned} -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad -\lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x}, \quad T_{L-0} = T_{r \perp 0}, \quad x = d, \\ -\lambda_\Sigma \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_v - T_n) + \sigma \varepsilon_{\text{пр}}(T_v^4 - T_n^4), \quad x = \delta, \quad T = T_0, \quad \delta = L, \quad t = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

В (4), (5)  $d$  — толщина слоя металла;  $c_m$ ,  $\rho_m$ ,  $\lambda_m$  — теплофизические характеристики металла;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  — приведенная степень черноты; индекс  $p$  соответствует нагреваемой поверхности ВТОЗП,  $v$  — внешней среде.

В такой постановке задача сводится к решению задачи теплопроводности для двухслойной пластины ВТОЗП — металл с одной подвижной границей (рис. 1).

Сформулированная математическая модель отличается от известных моделей теплопереноса во вспучивающихся теплоогнезащитных покрытиях [1, 2] физической интерпретацией процесса теплообмена в слое кокса ВТОЗП. Принимается, что ВТОЗП представляет собой твердый каркас и имеет сквозные поры, заполненные прозрачными для теплового излучения газообразными продуктами термического разложения исходного материала [4]. При этом, как замечено в экспериментах [1], поры являются почти замкнутыми на внешней (нагреваемой) поверхности. Пористость равна 0,9 в слое материала на небольшом удалении от нагреваемой поверхности и 0,2–0,4 в тонком ( $\delta = 0,5$  мм) слое каркаса кокса, разделяющем внешнюю среду и вспучивающийся материал. Такая структура материала характерна для большинства реальных ВТОЗП. Отличие данной модели от модели [1] состоит также в том, что суммарный коэффициент теплопроводности  $\lambda_\Sigma$  рассчитывается по традиционным зависимостям для пористых материалов [7], прошедшим проверку при решении большого числа задач [4, 5].

Для расчета относительной объемной деформации вспучивания  $\varepsilon$  использовалась зависимость [1]

$$\varepsilon = \begin{cases} 0, & T < T_n, \\ \varepsilon_0 \frac{T - T_n}{T_k - T_n}, & T_n \leq T \leq T_k, \\ \varepsilon_0, & T > T_k. \end{cases} \quad (6)$$

Температуры начала  $T_n$  и конца  $T_k$  вспучивания принимались, как и в [1], равными температуре начала газовыделения и коксования (перехода в хрупкое состояние) каркаса обугленного слоя. В расчетах коэффициент  $\varepsilon_0$ , теплофизические и термокинетические постоянные задачи брались такими же, как и в [1].

Сформулированная система нелинейных дифференциальных уравнений, краевых и начальных условий решена методом конечных разностей [8]. Для ее решения применен метод итераций с использованием прогонки на каждой итерации [8]. Параметры применявшейся неявной итерационной четырехточечной схемы [8] выбирались таким образом, чтобы обеспечить аппроксимацию не ниже  $h^2$  ( $h$  — шаг разностной сетки по координате  $x$ ) для всех расчетных режимов.

В связи с деформацией области решения в процессе численного анализа использовалась нерегулярная и неравномерная разностная сетка, параметры которой также выбирались исходя из условий обеспечения сходимости и устойчивости решения [8]. На каждом временном слое осуществлялась перестройка разностной сетки. Значения температуры и вспомогательных параметров в узлах новой сетки определялись интерполяцией по значениям искомой функции и параметров в узлах старой сетки.

Для проведения численных исследований разработаны алгоритм и программа решения задачи на языке ФОРТРАН. Расчеты выполнены для нескольких наиболее важных для

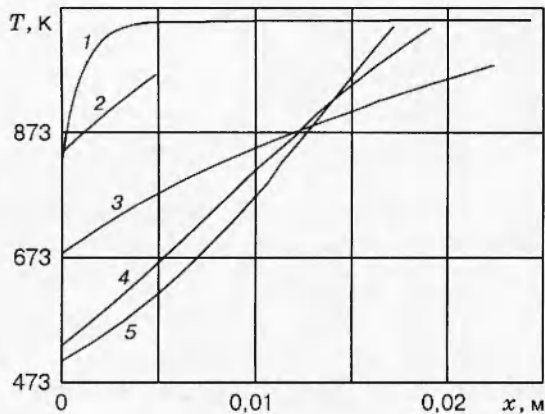


Рис. 2

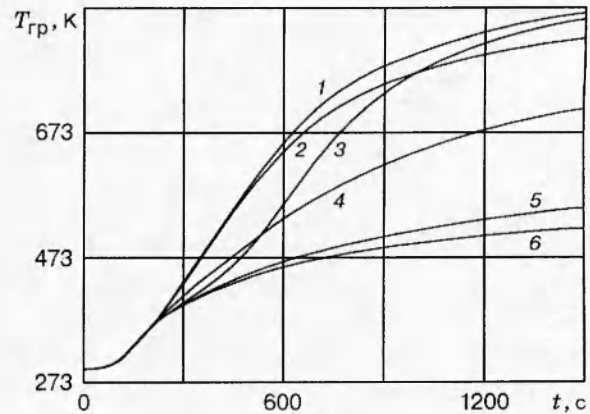


Рис. 3

Рис. 2. Результаты расчета распределения температуры по координате  $x$  при  $t = 10^3$  с: 1 — расчет с учетом радиационного теплового потока и вспучивания покрытия (основной вариант); 2 — без учета вспучивания ( $\epsilon = 0$ ); 3–5 — с учетом радиационного переноса по модели «лучистой теплопроводности» [1] при  $\gamma = 10^{-9}$ ,  $10^{-10}$ , 0 соответственно

Рис. 3. Зависимости температуры на границе защищаемой конструкции от времени: 1 — вспучивание отсутствует ( $\epsilon = 0$ ); 2 — вспучивание и радиационный теплоперенос отсутствуют ( $\epsilon = 0$ ,  $q_n = 0$ ); 3 — расчет с учетом вспучивания покрытия и радиационного теплопереноса (основной вариант); 4–6 — расчет радиационного теплопереноса по модели «лучистой теплопроводности» [1] при  $\gamma = 10^{-9}$ ,  $10^{-10}$ , 0 соответственно

анализа вариантов: радиационный теплоперенос в коксе ВТОЗП описывается в рамках модели (1)–(6), в рамках модели [1] при  $\gamma = 10^{-9}$  и  $\gamma = 10^{-10}$  радиационный теплоперенос в слое кокса ВТОЗП отсутствует ( $\gamma = 0$ ), вспучивание отсутствует ( $\epsilon = 0$ ).

Эмпирический параметр  $\gamma$  входит в выражение для суммарного коэффициента теплопроводности кокса [1]

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \varphi + \lambda_2 (1 - \varphi) + \gamma \sigma T^3.$$

На рис. 2, 3 представлены типичные результаты численного решения. Распределение температуры по толщине материала (рис. 2) показывает, что основную роль в передаче тепла через ВТОЗП играет излучение. Относительная доля теплового потока за счет непосредственно теплопроводности не превышает для типичных режимов пожаров в помещениях [9] 10% от общего суммарного потока. Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что предложенная в данной работе модель теплофизических процессов во вспучивающихся теплоогнезащитных материалах обеспечивает возможность оценки вклада каждого механизма переноса тепла с учетом реальных условий. Например, в слое кокса ВТОЗП с пористостью более 0,9 перепад температур по толщине в отсутствие радиационного теплопереноса в порах слоя достигает 600 К, и температура на границе ВТОЗП — защищаемая конструкция ( $T_{гр}$ ) к моменту времени  $t = 10^3$  с не превышает 500 К (рис. 3). В то же время при учете радиационного переноса перепад  $T$  снижается до 100 К, а  $T_{гр}$  достигает 900 К при прочих фиксированных параметрах.

Кроме того, численный анализ показывает (см. рис. 2), что при полном учете радиационного теплового потока значение  $T_{гр}$  очень незначительно отличается от температуры в невспучивающихся покрытиях с той же начальной толщиной. Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что эффективность вспучивающихся покрытий может быть

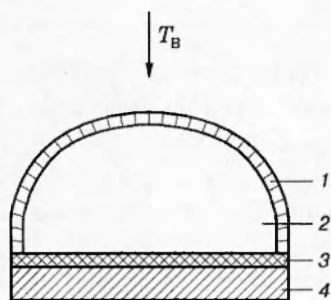


Рис. 4. Схема механизма вспучивания ВТОЗП с армированным приповерхностным слоем:

1 — армированный каркас «экрана»; 2 — газовая прослойка; 3 — ВТОЗП в исходном состоянии; 4 — слой металла (защищаемая конструкция)

достоверно оценена только при корректном учете радиационного теплопереноса в коксе таких материалов.

Необходимо подчеркнуть, что поры у ВТОЗП в отличие, например, от пенопластов, пористость которых также очень высока (до 0,95) и поры замкнуты во всем объеме, не только вытянуты к нагреваемой поверхности, но и, как у большинства материалов, являются разомкнутыми.

На рис. 3 приведены зависимости  $T_{гр}$  от времени для тех же условий теплообмена, что и на рис. 2. Видно, что отмеченные выше особенности механизма переноса тепла в слое кокса вспучивающихся теплоогнезащитных материалов проявляются в течение всего рассмотренного интервала времени. Для этого интервала характерно полное завершение процесса вспучивания покрытия.

Полученные результаты позволяют оценить эффективность применения ВТОЗП, для которых механизм вспучивания наиболее вероятен [1]. Принципиальная схема, иллюстрирующая этот механизм, приведена на рис. 4. В результате физико-химических процессов, протекающих в материале при нагреве до температур порядка 400–600 К, происходит отслоение тонкого приповерхностного слоя, обладающего повышенной прочностью по сравнению с прочностью кокса типичных ВТОЗП. Такой слой может быть изготовлен, например, с использованием армирующих волокон или даже тканей. Между этим слоем и зоной физико-химических превращений образуется газовая прослойка с незначительными вкраплениями конденсированных продуктов реакций (кокса). Толщина этой прослойки растет по мере продвижения зоны физико-химических превращений в глубь материала. В общем случае эта величина зависит не только от характеристик материала, но и от параметров внешней среды (температуры, давления, скорости движения газов, интенсивности механических воздействий и др.), т. е. возможно создание над поверхностью защищаемой конструкции специального «экрана», расположенного на некотором удалении от этой поверхности. Такой вариант является некоторой идеализацией общего механизма работы любого вспучивающегося покрытия, но он может быть реализован на практике, поскольку более устойчив к внешним механическим воздействиям, чем любые вспучивающиеся материалы с пористостью более 0,85.

Проведен численный анализ эффективности применения такого ВТОЗП на основе математической модели теплофизических процессов в покрытии, сформулированной в начале работы (уравнения (1), (4), соотношения (2), граничные и начальные условия (5)). Расчет координат положения «экрана» и толщины газового зазора проводился со значениями  $\epsilon$ , полученными при проведении расчетов обычного ВТОЗП по приближенной модели, описанной выше. Суммарная толщина покрытия с «экраном» в каждый момент времени принималась равной толщине ВТОЗП без «экрана» в рассмотренной выше задаче.

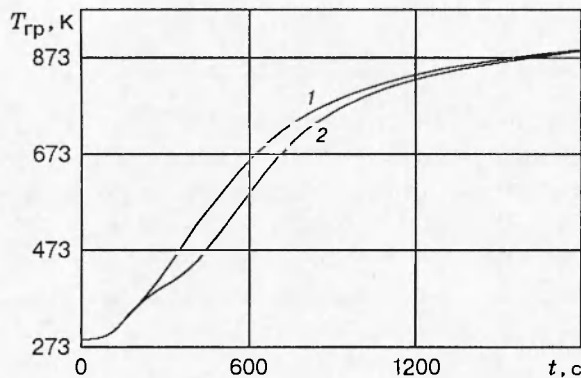


Рис. 5. Зависимость температуры на границе защищаемой конструкции от времени:

1 — без учета вспучивания; 2 — с учетом вспучивания при наличии «экрана»

Установлено, что покрытия такого типа снижают уровень разогрева защищаемой конструкции, но этот эффект незначителен (15–20 %) по сравнению с вариантом, когда используется обычное покрытие малой толщины, равной начальной толщине вспучивающегося покрытия (рис. 5). Радиационный теплообмен между «экраном» и поверхностью защищаемого тела приводит к резкому подъему температуры на границе конструкция — газовая прослойка по сравнению с вариантом, когда лучистый перенос энергии отсутствует. На этом основании можно сделать вывод о том, что покрытия рассматриваемого типа также дают не очень высокий (в пределах 15–20 %) эффект снижения температуры поверхности защищаемого объекта.

Можно предположить, что на эффективность вспучивающихся теплоогнезащитных покрытий влияют оптические характеристики среды, находящейся между их внешней и внутренней поверхностями. Но поскольку определение таких характеристик, как, например, коэффициент поглощения излучения для кокса ВТОЗП, пока невозможно, оценить масштабы этого влияния трудно.

В известных работах по анализу теплофизических процессов в тепло- и теплоогнезащитных материалах при расчете теплового потока к нагреваемой поверхности кокса обычно предполагается, что газообразные продукты физических и химических процессов, протекающих при нагреве таких материалов до высоких температур, являются абсолютно прозрачными [1, 2, 4, 5]. Это допущение не приводит к заметным отклонениям результатов теоретического анализа от экспериментальных данных [1, 2, 4, 5], что свидетельствует о его правомерности.

Следует также отметить, что вклад радиационного теплообмена в слое кокса теплозащитных материалов (ТЗМ) специально до настоящего времени не оценивался. В моделях [4, 5] использовалось допущение о возможности учета в одном коэффициенте теплопроводности  $\lambda_{\Sigma}$  суммарного эффекта молекулярного и радиационного переноса тепла (по пористому каркасу и внутри него). Такое объединение было возможно, так как размер пор в типичных ТЗМ был достаточно мал по сравнению с глубиной прогрева. Это допущение в [4, 5] обосновано не только малыми размерами пор и низкой пористостью типичных ТЗМ. Типичные теплозащитные материалы изготавливаются с использованием армированных волокон или гранул наполнителя, расположенных слоями в плоскости, перпендикулярной вектору теплового потока в ТЗМ. По этой причине поры, образующиеся при термическом разложении исходного полимера, не являются сквозными. При этом поры невспучивающихся ТЗМ имеют характерный размер по координате, совпадающей по направлению с вектором теплового потока в ТЗМ, не более толщины армирующих волокон или гранул.

Однако для вспучивающихся материалов с конечной пористостью более 0,8 указанное выше допущение не является обоснованным, так как в типичном ВТОЗП поры сквозные и



размер пор незначительно отличается от глубины прогрева. Полученные в данной работе результаты выходят за границы области применения широко известных моделей [4, 5], но подтверждают обоснованность этих границ.

Таким образом, проведенные численные исследования комплекса теплофизических процессов, протекающих в слое вспучивающегося теплоогнезащитного покрытия, показали, что в них доминирует радиационный теплоперенос и оценка эффективности процесса должна проводиться с учетом переноса энергии излучением в слое кокса ВТОЗП. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что применение моделей [1, 2] не является достаточным для доказательства эффективности вспучивающихся теплоогнезащитных покрытий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П.** Расчет нестационарного прогрева многослойных огнезащитных конструкций // *Вопр. оборон. техники*. 1994. Сер. 15. Вып. 1/2. С. 30–36.
2. **Исаков Г. Н., Кузин А. Я.** Моделирование и идентификация процессов теплопереноса во вспучивающихся теплозащитных материалах // *ПМТФ*. 1996. Т. 37, № 4. С. 126–134.
3. **Оцисик М. Н.** Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976.
4. **Гришин А. М.** Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1973.
5. **Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К.** Взаимодействие материалов с газовыми потоками. М.: Машиностроение, 1976.
6. **Николаевский В. Н., Баскиев К. С., Горбунов А. Т.** Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
7. **Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б.** Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
8. **Самарский А. А.** Теория разностных схем. М.: Наука, 1983.
9. **Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н.** Термогазодинамика пожаров в помещениях. М.: Стройиздат, 1988.

*Поступила в редакцию 20/І 1997 г.,  
в окончательном варианте — 5/VI 1997 г.*

---