

УДК 699.814:614.841.33.001.57

**Л. В. Дранишников**, доктор технических наук,  
доцент кафедры программного обеспечения  
автоматизированных систем Днепропетровского государственного  
технического университета

**Л. Н. Божуха**, кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры программного обеспечения автоматизированных систем  
Днепропетровского государственного технического университета

### СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА В ПЛОСКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЫ

*Розроблено методика та алгоритм розрахунку для оцінки ефективності роботи вогнезахисних покриттів, яка дозволяє робити оцінку вогнестійкості в плоских конструкціях довільної шаруватої структури з будь-яких матеріалів при зовнішньому тепловому впливі: стандартна пожежа, тепловий удар при вибухах, тепловий вплив вогневої кулі.*

*Разработана методика и алгоритм расчета для оценки эффективности работы огнезащитных покрытий, которая позволяет производить оценку огнестойкости в плоских ограждающих конструкциях произвольной слоистой структуры из любых материалов при внешнем тепловом воздействии: стандартный пожар, тепловой удар при взрывах, тепловое воздействие огневого шара.*

*Designed methods and algorithm of the calculation for estimation of efficiency of the work fire-protective covering, which allows to produce the estimation fire-resistancy in flat barriering design of the free flaky structure from any material under external thermal influence: standard fire, heatstroke at blast, heat influence of the fire ball.*

**Ключевые слова.** Оценка огнестойкости, плоские ограждающие конструкции, слоистая структура.

**Введение.** Проблема снижения горючести материалов и повышения огнестойкости конструкций выделена в настоящее время в одно из приоритетных научных направлений фундаментальных и прикладных исследований. В нем предусмотрено выполнение работ, направленных на обеспечение противопожарной защиты, разработку огнезащитных средств, снижающих горючесть материалов и повышающих огнестойкость строительных конструкций, разработку и совершенствование методов определения пожарной опасности материалов. Основными требованиями к теплозащитному материалу являются высокий теплозащитный эффект, стойкость к температурному воздействию, механическая прочность, относительная легкость и конструкционность. В зависимости от системы защиты требуются материалы, обладающие теплопоглощительными или теплоотражательными свойствами. Для вновь проектируемых средств теплозащиты необходимо подбирать оптимальные по стоимости и по эффективности составы покрытий, красок, обмазок и специальные материалы.

**Постановка задачи.** Анализ пожарной опасности показывает, что ощутимый материальный ущерб экономике всего мира наносят пожары. Пожар на объекте рассматривается как горение, не предусмотренное технологическим процессом, и является причиной по-

© Л. В. Дранишников, Л. Н. Божуха, 2010

вреждения и разрушения зданий, различных объектов, как в результате сгорания горючих конструктивных элементов, так и деформаций (тепловой ползучести) нагруженных конструкций от интенсивного нагрева. Таким деформациям подвержены железобетонные и металлические конструкции (особенно без защитной изоляции) вследствие уменьшения прочности и упругих характеристик материалов с ростом температуры. Многие из применяемых в строительстве материалов являются высокочувствительными к воздействию высоких температур и огня, выделяя при горении большое количество тепла и токсичных веществ. Металлические конструкции при огневом воздействии быстро прогреваются до критических температур, что ведет к потере их несущей способности. Как показывает практика, горючесть применяемых материалов и низкий предел огнестойкости строительных конструкций являются основными причинами значительного материального ущерба и гибели людей при пожарах. Поэтому снижение горючести материалов, повышение огнестойкости конструкций, разработка композитных материалов и методик оценки эффективности работы огнезащитных покрытий являются актуальной научно-технической проблемой.

**Результаты исследований.** Под огнестойкостью понимают способность строительных конструкций сохранять в условиях пожара ограждающую и несущую способность. Огнестойкость и повышение огнестойкости конструкций тесно увязаны с влиянием температурного фактора и происходящими при этом процессами тепломассопереноса. Их аналитическое изучение позволяет по-новому подойти к вопросу горючести, огнестойкости, огнезащиты строительных материалов и конструкций. Предел огнестойкости конструкций определяется временем от начала теплового воздействия до возникновения одного из предельных состояний по огнестойкости: 1) по потере плотности, 2) по потере теплоизоляции (повышение температуры на необогреваемой поверхности в среднем более чем на 160°C или более 220°C, независимо от начального значения, то есть температуры воспламенения распространенных сгораемых материалов: тканей, бумаги, древесной стружки), 3) по потере несущей способности конструкций.

Для ненесущих конструкций, с огнезащитными покрытиями и без таковых, учитывают 1-е и 2-е предельные состояния. Для несущих конструкций основным является 3-е предельное состояние.

Предел огнестойкости конструкций определяют экспериментально при стандартном огневом воздействии. На основной стадии пожара строений средняя температура в помещениях постепенно повышается при почти полном сгорании сгораемых материалов, достигая максимума.

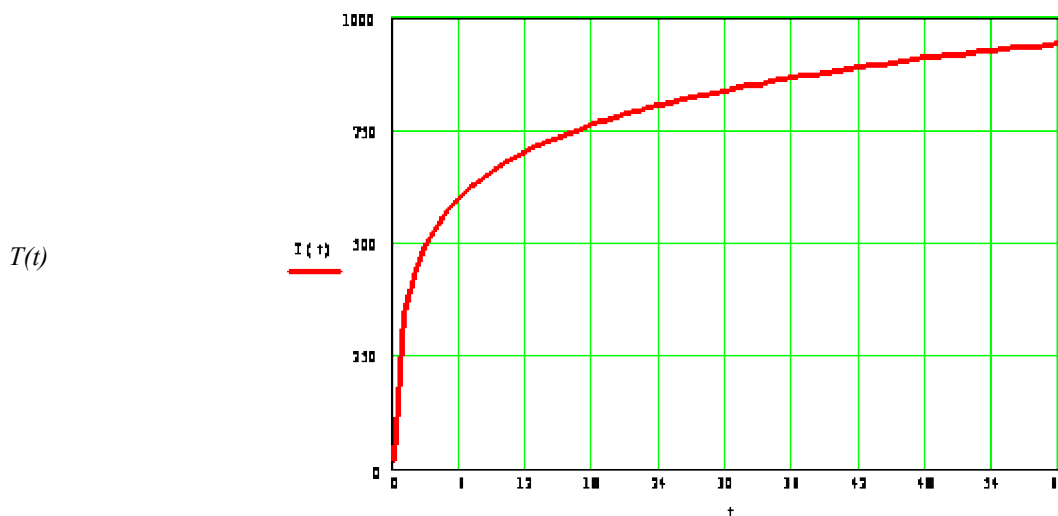
Изменение со временем  $t$  температуры  $T_{cp}(t)$  среды пожара (рис. 1) описывают эмпирическими формулами, полученными усреднением натуральных измерений (данная аппроксимация рекомендована международной организацией по стандартизации ИСО [1] в качестве "стандартного пожара"), вида

$$T_p(t) = A + B \cdot \lg(C \cdot t + 1), \quad (1)$$

где  $A = T_0$  (начальная температура, °C),  $B = 345$ ,  $C = 8$ ,  $t$  – в минутах или  $C = 0,133$ ,  $t$  в секундах.

Исходные нормируемые пожарно-технические показатели в строительстве включают: возгораемость для материалов; предел огнестойкости и предел распространения огня – для конструкций; степень огнестойкости – для зданий. Пределом распространения огня является размер, повреждения конструкций в результате горения за пределами зоны непосредственного нагрева.

Оценка огнестойкости конструкций по несущей способности проводится расчетным путем в два этапа. На первом этапе определяют изменение со временем температурного поля в конструкции от действия “стандартного” пожара (рассчитывается критическая температура, при которой происходит разрушение конструкции вследствие температурной ползучести, то есть определяют время прогрева конструкции до критической температуры, называемое пределом огнестойкости по несущей способности), а на втором – проводят на основе экспериментов прочностной расчет конструкции с учетом снижения ее несущей способности от уменьшения сопротивляемости деформированию материалов при нагреве (статистическая часть расчета). Прочностным расчетом устанавливается время потери несущей способности нагретой конструкции с учетом понижения пределов прочности материалов. Прочностные характеристики материалов в зависимости от температуры  $T$  определяют на основе экспериментов. Зависимость прочности арматурной стали, например ст. 3, от температуры, построенная по экспериментальным данным, показана на рис. 2.



t

Рис. 1. Изменение температуры  $T$  °C в среде пожара в зависимости от времени (мин)

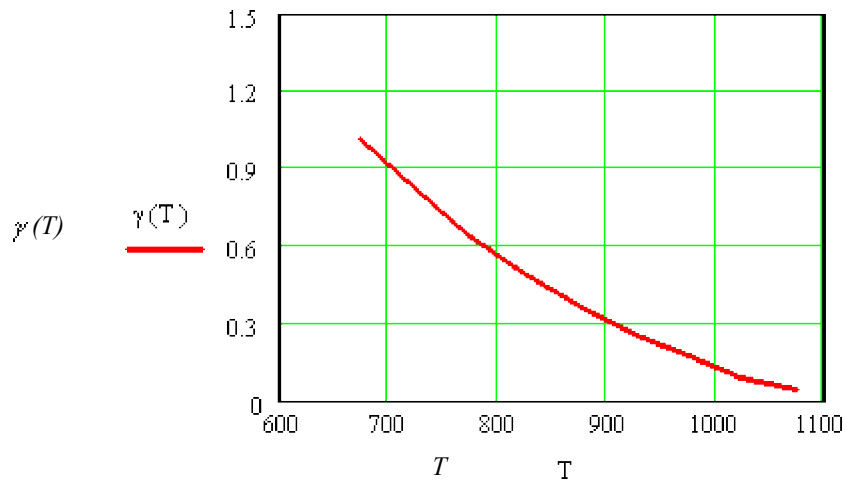


Рис. 2. Зависимость снижения прочности арматурной стали ст. 3 от температуры, °С

В значительной мере пожарная безопасность зданий и сооружений зависит от достоверной оценки огнестойкости и повышения огнестойкости применяемых конструкций. Огнестойкость оценивают экспериментальными и расчетными методами. Экспериментальные методы являются основными источниками информации, однако из-за высокой стоимости, трудоемкости все больше уступают место расчетным. Например, определение предела огнестойкости металлических конструкций сводится к решению уравнения теплового баланса при нагреве металлической пластины толщиной  $\delta_{np}$  [2], одна из поверхностей которой теплоизолирована:

$$c_{cp} \rho \delta_{np} \frac{dT_{cm}}{dt} = \alpha_{cp} (T_B(t) - T_{cm}), \quad (2)$$

где  $\alpha_{cp}$  – средний коэффициент теплопередачи к поверхности металла;  $T_B(t)$  – температура по стандартной кривой развития пожара;  $T_{cm}$  – температура пластины °С;  $\rho$  – плотность материала;  $c_{cp}$  – среднее значение коэффициента удельной теплоемкости;  $\delta_{np}$  – приведенная толщина металла;  $t$  – время. Решение уравнения (2) методом Рунге–Кутты с автоматическим выбором шага представлено на рис. 3. По кривой, представленной на рис. 3, можно определить время достижения критической температуры (мин) задаваясь различными значениями  $\delta_{np}$ .

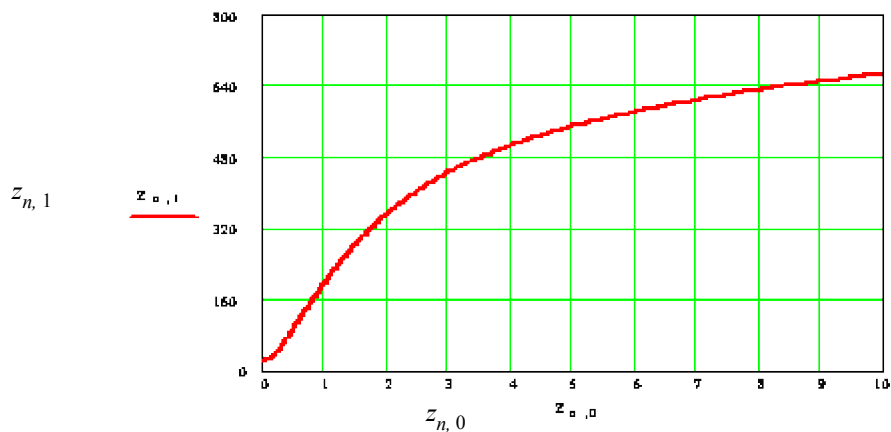


Рис. 3. Зависимость температуры металла от времени (мин) для  $\delta_{np} = 0,003$  м.

В работе [5] после обработки экспериментальных данных была получена эмпирическая зависимость для определения предела огнестойкости от приведенной толщины:

$$\tau = e^{-1.41 \delta_{np}^{0.304}},$$

где  $\tau$  – предел огнестойкости (час);  $\delta_{np}$  – приведенная толщина металла, см.

На рис. 4 представлена зависимость предела огнестойкости (мин) от приведенной толщины металла, которая наиболее полно описывает экспериментальные данные, полученные по различным методикам (отклонения не превышают 3,5 %).

При воздействии теплового излучения строительные конструкции прогреваются, и происходит передача тепла во внутренние помещения зданий через ограждения. В пределах огнестойкости ограждающих конструкций изменяющиеся со временем температурные поля определяются на основе решения уравнения теплопроводности.

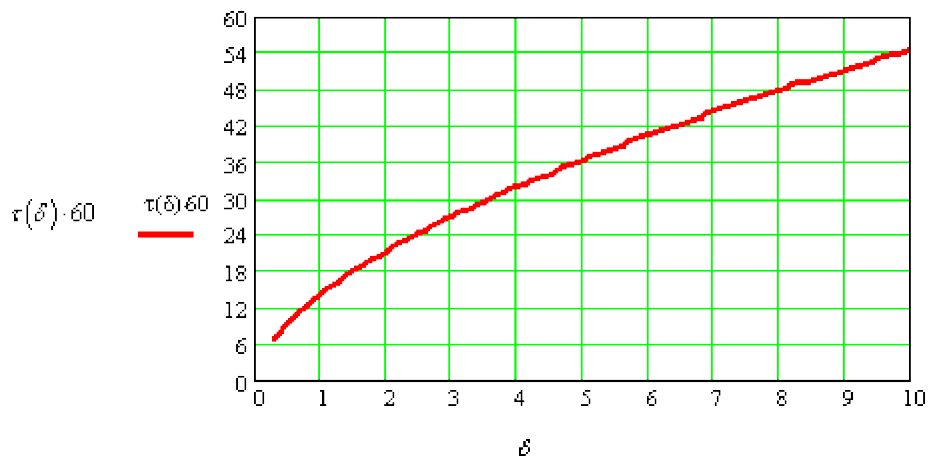


Рис. 4. Зависимость предела огнестойкости прогрева стальных пластин  $\tau$  (мин) в зависимости от приведенной толщины металла  $\delta_{пр}$  (см)

Методика определения теплозащитных свойств сложных по структуре строительных и других конструкций осуществляется теплотехническим расчетом с определением температуры прогрева во времени слоев материала и воздуха во внутреннем объеме объекта и основана на численном интегрировании одномерного уравнения теплопроводности (расчет температурных полей) для композитной преграды с произвольной слоистой структурой из любого материала. Решение двумерных и трехмерных задач нестационарной теплопроводности можно получить на основе результатов расчета по одномерной схеме, поскольку решение уравнений неоднородной теплопроводности представимо произведением решений одномерной теплопроводности.

Например, решение для температуры  $T(x, y, z, t)$  в точке  $x, y, z$  параллелепипеда в момент времени  $t$  определяется произведением одномерных решений для бесконечных пластин

$$\frac{T(x, y, z)}{T_0} = \frac{T_1(x, t) \cdot T_2(y, t) \cdot T_3(z, t)}{T_0^3}$$

В качестве внешнего воздействия (граничное условие) может быть использована вышеприведенная функция “стандартного пожара” или произвольная функция времени температуры внешнего источника – тепловой удар при взрыве или воздействие огневого шара при воспламенении облака парогазовоздушной смеси.

Рассмотрим физико-математическую постановку задачи нестационарной теплопередачи через многослойное ограждение. Рассмотрение баланса энергии для элемента объема в твердом теле приводит к уравнению теплопроводности

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q' \quad (3)$$

При независимости параметра  $\lambda$  от температуры уравнение (3) примет вид

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q' \quad (\lambda = \text{const})$$

Здесь  $T(x, y, z, t)$  – температура, зависящая от координат и времени,  $\rho$  – плотность материала,  $c_p$  – теплоемкость материала,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, зависящий от температуры,  $q'$  – интенсивность внутреннего тепловыделения в единице объема,  $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

Задача состоит в отыскании изменения температуры  $T(x, y, z, t)$  и тепловых потоков  $q'$  во времени и пространстве по толщине ограждения  $x$ . Для нахождения решения должны быть заданы: 1) начальные условия, определяющие распределение температуры в толще и на границах ограждения в начальный момент времени; 2) уравнения теплопроводности, описывающие процесс передачи тепла через толщу конструкции; 3) граничные условия, определяющие условия теплообмена на всех характерных поверхностях.

Внутреннее тепловыделение может происходить в связи с химическими реакциями и фазовыми переходами, выделяющими или поглощающими тепло. Так, во влажных материалах при температурах кипения происходит испарение влаги с поглощением энергии. Поглощение энергии происходит при плавлении материала и достижении температуры плавления.

Для однородной преграды задача состоит в решении уравнения (3) для одномерного случая с начальным условием  $T|_{x=0} = T_0$ . Начальным условием может быть предположение об одинаковой начальной температуре для всей системы. В качестве граничного условия на обогреваемой поверхности задается функция среды  $T_B(t)$  изменения температуры обогревающей среды совместно с уравнением

$$\frac{\partial T_H(t)}{\partial x} = \frac{\alpha}{\lambda} [T_B(t) - T_H(t)], \quad (4)$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплообмена, равный  $\alpha = \alpha_k + \alpha_r$ ;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи за счет конвекции;  $\alpha_r$  – коэффициент лучистого теплообмена, зависящий от температуры и свойств поверхности тела (фиксируемых степенью черноты).

Для граничного условия на необогреваемой поверхности можно использовать уравнение нагрева воздуха в объеме  $V$  от притока тепла совместно с уравнением типа (4), в котором  $\alpha$  приобретает смысл коэффициента теплопередачи от внутренней поверхности с температурой  $T_{BH}(t)$  в воздушную среду при температуре  $T_H(t)$  или реализуется условие конвективного теплообмена со средой, имеющей обычную температуру  $T_C$ :

$$-\lambda(T) \frac{\partial T_{BH}}{\partial x} \Big|_{x=L} = \alpha_k \left( T_{BH} \Big|_{x=L} - T_C \right). \quad (5)$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи вычисляется как

$$\alpha = \alpha_k + \frac{\sigma \varepsilon_{np}}{(T_B(t) - T_H(t))} \left\{ \left[ \frac{T_B(t)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_H(t)}{100} \right]^4 \right\},$$

где  $\sigma$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный  $5,669 \text{ sm}/(\text{M}^2 \cdot \text{C}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты теплового излучения системы “греющая среда – обогреваемая поверхность покрытия”, равная  $\varepsilon_{np} = \left[ (1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1 \right]^{-1}$ ;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степени черноты греющей поверхности (например, огневой камеры) и обогреваемой поверхности, соответственно.

Для обогреваемых поверхностей коэффициент  $\alpha_k, \text{ sm}/(\text{M}^2 \cdot \text{C}^2 \cdot \text{K})$  определяется из соотношения [3] (свободная конвекция при давлении  $P$  и температуре  $T_0$ , близкой к комнатной)

$$\alpha_k = b_f \Delta T^{0,33} \sqrt{P},$$

где  $\Delta T$  – температурный напор,  $K$ ;  $P$  – давление в атмосферах;  $b_f$  – коэффициент, зависящий от ориентации преграды (для вертикальных стен, плит  $b_1 = 2$ , для горизонтальных плит, обращенных вверх,  $b_1 = 2,5$ , для горизонтальных плит, обращенных вниз,  $b_1 = 1,314$ ).

Для необогреваемых поверхностей коэффициент  $\alpha_x$  определяется по формуле

$$\alpha_x = \frac{\sigma \varepsilon}{(T_{BH}(t) - T_H(t))} \left\{ \left[ \frac{T_{BH}(t)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_H(t)}{100} \right]^4 \right\},$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности.

Изменение со временем температуры  $T_H(t)$  воздушной среды за ограждением определяется из уравнения баланса тепла:  $Q_x$  – излучаемого необогреваемой поверхностью с температурой  $T_{BH}(t)$ , и тепла  $Q$ , получаемого воздухом. Мощность излучения единицы площади необогреваемой поверхности равна

$$\frac{dQ_x}{dt} = \alpha = \alpha_x + \alpha_k.$$

Для притока тепла в объем с размером  $L$  вдоль вектора теплового потока имеем

$$\frac{dQ}{dt} = \rho c_{ps} L \frac{dT_H}{dt}.$$

Из уравнения баланса тепла получаем уравнение для температуры  $T_H(t)$

$$\frac{dT_H}{dt} = \alpha / (\rho c_{pH} L)$$

Для неоднородной (слоистой) преграды задача состоит:

1) в решении квазилинейного уравнения теплопроводности с переменными коэффициентами:

$$c\rho(x) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (6)$$

где  $c\rho(x), \lambda(x)$  – заданные значения коэффициентов теплоемкости и теплопроводности отдельных материальных слоев в конструкции, ступенчато изменяющиеся от слоя к слою; в общем случае эти коэффициенты могут быть заданы изменяющимися по определенному закону в пределах каждого слоя переменными во времени, зависящими от температуры, что особенно важно для высокотемпературных процессов;

2) в решении системы одномерных уравнений (1) для каждого слоя соответствующей толщины. Каждое уравнение записывается для отдельного слоя с дополнительными условиями на границах (стыках) материальных слоев [6]:

$$\begin{aligned} \text{для слоя 1} \quad c_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right] + q_1'(T_1); \\ \text{для слоя 2} \quad c_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \right] + q_2'(T_2); \\ \text{для слоя } n \quad c_n(T_n) \frac{\partial T_n}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_n(T_n) \frac{\partial T_n}{\partial x} \right] + q_n'(T_n), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $c_i(T_i), \lambda_i(T_i)$  – объемные коэффициенты теплоемкости и теплопроводности  $i$ -го слоя, зависящие от температуры;  $q_i'(T_i)$  – мощность тепловых источников  $i$ -го слоя, зависящая от температуры.

Стыковка между слоями осуществляется с помощью граничных условий 4-го рода, предусматривающих равенство тепловых потоков и температур на границе слоев. На границе между слоями 1 и 2 задано граничное условие 4-го рода, которое определяется равенством тепловых потоков:

$$\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{II} = \lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{II} \quad (8)$$

и температур

$$T_1 \Big|_{II} = T_2 \Big|_{II} \quad (9)$$

Такое же условие записывается на границе на стыке между слоями 2 и 3:

$$\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{III} = \lambda_3(T_3) \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{III}; \quad (10)$$

$$\boxed{\text{...}} \quad (11)$$

В такой постановке можно решать задачи теплопередачи для многослойных композитных преград сложной структуры, то есть методика основана на численном интегрировании одномерного уравнения теплопроводности для композитной преграды с произвольной слоистой структурой из любых материалов.

В качестве внешнего воздействия со стороны очага пожара (граничное условие) может быть использована функция “стандартного пожара”, которая описывает температурно-временной режим стандартного теплового воздействия во время испытания на огнестойкость или произвольная функция времени температуры внешнего источника – тепловой удар при взрыве или воздействия огневого шара при воспламенении облака парогазовоздушной смеси.

Задача (7) может быть решена только численными методами. Для высокотемпературных процессов коэффициент теплопроводности является нелинейной функцией температуры (рис. 5). Кроме того, источники тепла (правые части в уравнении теплопроводности) могут зависеть от температуры, например, если тепло выделяется в результате химической реакции. Для решения квазилинейных уравнений теплопроводности применяют разностные схемы (интегроинтерполяционный метод) [4]. Использование явных схем нецелесообразно, если  $\lambda(T), c(T), q'(T)$  являются быстроменяющимися (например, степенными) функциями температуры, так как условие устойчивости явной схемы требует очень мелкого шага по времени. Поэтому для нахождения численного решения применяют безусловно устойчивые неявные схемы – линейные и нелинейные относительно  $T^{n+1}$ .

Схема а):

$$\frac{T_k^{n+1} - T_k^n}{\tau} = \frac{1}{h^3} \left[ a_{k+1}(T^n)(T_{k+1}^{n+1} - T_k^{n+1}) - a_k(T^n)(T_k^{n+1} - T_{k-1}^{n+1}) \right] + f(T_k^n)$$

Схема б):

$$\frac{T_k^{n+1} - T_k^n}{\tau} = \frac{1}{h^3} \left[ a_{k+1}(T^{n+1})(T_{k+1}^{n+1} - T_k^{n+1}) - a_k(T^{n+1})(T_k^{n+1} - T_{k-1}^{n+1}) \right] + f(T_k^{n+1}), \quad (12)$$

где  $a_k(T) = 0,5[\lambda(T_{k-1}) + \lambda(T_k)]$ ,  $\tau$  – шаг по времени,  $h$  – шаг по пространственной координате.

Схема а) линейна относительно значения функции  $T^{n+1}$  на слое  $l^{n+1}$ , и значения функции  $T^{n+1}$  находятся по значению функции  $T^n$  на слое  $l^n$  методом прогонки. Шаг по времени  $\tau$  выбирается из соображения точности. Схема б) нелинейная относительно функции  $T^{n+1}$ , и для нахождения ее решения используется метод итераций. В качестве нулевого приближения обычно берется значение  $T^n$  с предыдущего слоя. Решение задачи также находится методом прогонки. Для окончания итераций используется условие  $\max_{1 \leq k \leq N-1} |y_k^{s+1} - y_k^s| < \varepsilon$  ( $s$  – номер итерации). Итерационные схемы позволяют для обеспечения заданной точности использовать более крупный шаг по времени по сравнению с безитерационными схемами.

Построим разностную схему методом правой прогонки для задачи (7) с граничными условиями (7), (8) и условиями стыковки (4), (5). Рекуррентные формулы для прогоночных коэффициентов (число прогоночных коэффициентов равно числу слоев):

$$p_{k+1} = \frac{r \cdot a_{k+1}}{1 + r \cdot a_{k+1} + r \cdot a_k - r \cdot a_k \cdot p_k}; \quad k = 1, 2, \dots, N-1,$$

$$q_{k+1} = \frac{T_k^n + r \cdot a_k \cdot q_k}{1 + r \cdot a_{k+1} + r \cdot a_k - r \cdot a_k \cdot p_k}; \quad k = 1, 2, \dots, N-1. \quad (13)$$

Значения  $T_k^{n+1}$  находятся в противоположном направлении (обратный ход):

$$T_k^{n+1} = p_{k+1} \cdot T_{k+1}^{n+1} + q_{k+1}, \quad k = N-1, N-2, \dots, 1. \quad (14)$$

Начальн и условия  $T_0 = P_1 T_1 + q_1$ . Для внутренних слоев принимаются соответствующие значения коэффициентов теплопроводности композитных материалов. Значения температуры на границе слоя находят из условий стыковки (8)–(9). Ниже представлены полиномиальные уравнения и графики зависимости  $\lambda(T)$  для некоторых композитов, полученных после обработки экспериментальных данных, взятых из [5].

Покрытие ВЗП-9 содержит до 23 % фосфогипса и в качестве добавок асбеста – 3 и пеногасителя КЭ-10-25 – 0,5 %, ВЗП-1 содержит добавки регулятора свойств в композициях с наполнителем золой, ВЗП-А содержит горелую породу; ВЗП-8 – мочевино-формальдегидную смолу в сочетании с минеральным наполнителем и жидким стеклом, ВЗП-12 – сочетание жидкого стекла с пастой “Универсал”, содержащей органические и минеральные добавки и наполнители.

$$\text{ВЗП-9} \quad \lambda(T) = 0.1752 + 1.0806 \cdot 10^{-3} \cdot T - 5.7179 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 8.4814 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 3.8676 \cdot 10^{-12} \cdot T^4$$

$$\text{ВЗП-1} \quad \lambda(T) = 0.1972 + 5.1905 \cdot 10^{-4} \cdot T - 3.4703 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 5.2608 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 2.3348 \cdot 10^{-12} \cdot T^4$$

$$\text{ВЗП-А} \quad \lambda(T) = 0.1756 + 5.8173 \cdot 10^{-4} \cdot T - 3.3108 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 4.5517 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 1.7966 \cdot 10^{-12} \cdot T^4$$

$$\text{ВЗП-8} \quad \lambda(T) = 0.1756 + 4.1284 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2.8188 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 4.1577 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 1.8119 \cdot 10^{-12} \cdot T^4$$

$$\text{ВЗП-12} \quad \lambda(T) = 0.1659 + 3.161 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2.4846 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 3.9343 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 1.8397 \cdot 10^{-12} \cdot T^4$$

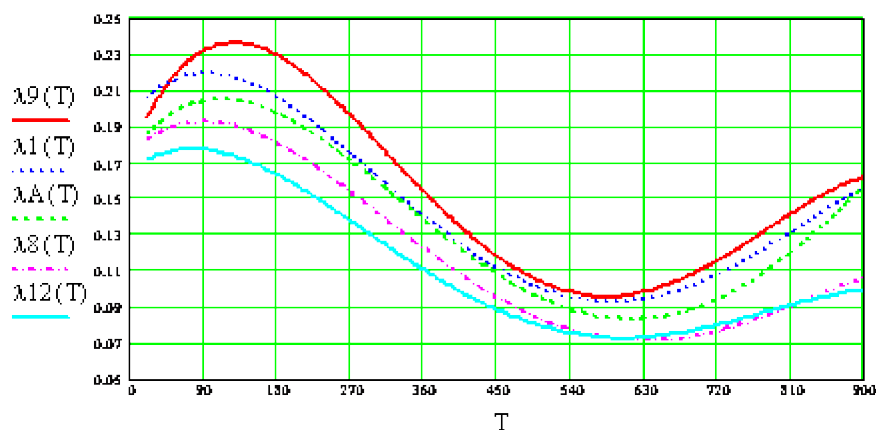


Рис. 5. Зависимости коэффициента теплопроводности от температуры для различных композитных материалов

**Выводы.** Таким образом, предложенная методика для оценки эффективности работы огнезащитных материалов позволяет производить оценку огнестойкости в плоских ограждающих конструкциях из любых материалов при внешнем тепловом воздействии: стандартный пожар, тепловой удар при взрывах, тепловое воздействие огневого шара. Предложенная методика основана на численном интегрировании одномерного уравнения теплопроводности для композитной преграды с произвольной слоистой структурой из любых материалов.

#### Литература

1. International Standard ISO 834. Fire-resistance tests. Elements of building construction.
2. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / Яковлев А. И. – М. : Стройиздат, 1988.
3. Мак-Адамс В. Теплопередача / Мак-Адамс В. – Л. ; М. : НКТП СССР, 1936.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем / Самарский А. А. – М. : Наука, 1977. – 656 с.
5. Беликов А. С. Теоретическое и практическое обоснование эффективности применения огнезащитных покрытий для снижения горючести материалов и повышения огнестойкости строительных конструкций / Беликов А. С. – Днепропетровск, 2000. – 196 с.
6. Дранишников Л. В. Методика оценки огнестойкости и теплозащитных свойств строительных конструкций / Дранишников Л. В. // Проблемы математического моделирования : тези доп. міждерж. науково-метод. конф. – Дніпродзержинськ, 2004. – С. 53–55.