

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-4.400>

УДК 614.84:699.81

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ ТЕРМИЧЕСКИ ТОНКОГО ТЕЛА, ЗАЩИЩЕННОГО ПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ

Шаршанов А.Я.

Рассмотрена защита плоского термически тонкого тела от теплового воздействия пожара. Защита осуществляется при помощи нанесенного на поверхность тела плоского однородного слоя инертного теплопоглощающего материала. Целью работы является нахождение зависимости температуры защищенного тела от времени теплового воздействия.

Вопрос сведен к линейной задаче нестационарной теплопроводности с граничными условиями третьего рода на внешних границах системы. Ее решение осуществлялось при помощи преобразований Лапласа по временной переменной.

Впервые получено аналитическое решение данной задачи при стационарных граничных условиях третьего рода. Оно представлено в безразмерном (критериальном) виде как зависимость относительной избыточной температуры термически тонкого тела от пяти критериев: 1) критерия Фурье для задачи прогрева теплозащитного слоя; 2) двух критериев Био; 3) отношения поверхностных теплоемкостей покрытия и термически тонкого тела; 4) относительной избыточной температуры среды с необогреваемой стороны. Зависимость температуры термически тонкого тела от времени имеет вид бесконечного ряда, слагаемые которого экспоненциально убывают с ростом времени. Получен явный вид зависимости слагаемых ряда от параметров задачи. Указан явный вид характеристического уравнения задачи и интервалы единственности корней этого уравнения, что значительно упрощает получение численного значения данных корней. Показано, что для большинства расчетов температуры достаточно двух первых членов соответствующего ряда.

На основе найденных соотношений в явном виде получены формулы функциональной зависимости предела огнестойкости от параметров термически тонкого тела и защитного покрытия. Полученные результаты позволяют рассчитывать предел огнестойкости защищенных металлических конструкций. Расширить применение полученных соотношений на металлические конструкции неплоского сечения можно, используя вместо толщины защищенных металлических конструкций их приведенную толщину.

Ключевые слова: термически тонкое тело, теплопоглощающее покрытие, нестационарная теплопроводность, предел огнестойкости.

(Поступила в редакцию 15 июля 2019 г.)

Введение. Пожар означает наличие представляющих опасность высокотемпературных источников тепла. Защита от их влияния является одной из основных проблем пожарной безопасности. Распространенным способом пассивной защиты термически тонкого тела (ТТТ) от данного источника опасности является использование защитных покрытий. В качестве инертного защитного покрытия чаще всего выступает наносимый на поверхность ТТТ поглощающий тепло слой защитного материала. Он либо вообще не допускает нагревания защищаемой поверхности до критического уровня температуры, либо отодвигает время его наступления.

Среди защищаемых объектов существенную часть составляют металлические конструкции. Такая ситуация вызвана относительно быстрым их нагреванием в условиях пожара.

Проблеме защиты металлических конструкций посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований. В нормативных документах, например, в

Еврокодах^{1,2,3}, даны конкретные рекомендации по оценке их огнестойкости. В связи с актуальностью проблематики исследования продолжаются [1, 2].

Теоретические работы по определению предела огнестойкости защищенных металлических конструкций, как и нормативные документы, предполагают численное решение соответствующих задач. Отсутствие аналитических результатов (даже в линейной постановке задачи прогрева) является следствием сложности ситуации. В настоящем исследовании защищаемое тело является термически тонким, что позволило упростить математическую модель задачи и найти ее решение.

Целью данной работы является получение соотношений для расчета температуры поверхности ТТТ (например, металлической стенки резервуара), защищаемого от внешнего теплового воздействия слоем инертного (не меняющего свою структуру в ходе нагревания) теплоизоляционного материала.

Вопрос формально сводится к решению задачи нестационарной теплопроводности в системе, состоящей из ТТТ, отделенного от падающего теплового потока пластиной конечной толщины. Внешние воздействия задаются как граничные условия на поверхностях этой пластины. Такая задача давно сформулирована, известна методика ее решения, однако обзорные аналитические решения найдены только в случае граничных условий первого рода [3]. Что касается граничных условий третьего рода, характеризующихся наличием конвекционного теплообмена защитного покрытия с внешней средой, аналитические решения отсутствуют.

Основная часть. В работе данная проблема традиционно рассматривается как одномерная задача прогрева плоской термически тонкой пластины, отделенной от внешнего теплового потока пластиной толщиной h , состоящей из защитного вещества. Схематично ситуация изображена на рисунке 1, где защитной пластине соответствуют значения пространственной координаты $0 < x < h$, а тонкому телу – $x = h$.

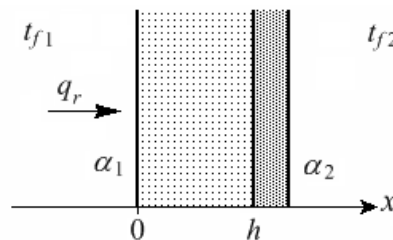


Рисунок 1. – Пространственная схема взаимного расположения защитной пластины, термически тонкого тела, омывающих сред и лучистого потока тепла

Уравнение нестационарной теплопроводности, определяющее поле температур $t(x, \tau)$ в защитном слое, имеет вид:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq h; \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала защитного слоя. Он равен

$$a = \frac{\lambda}{c'}, \quad \text{м}^2/\text{с},$$

¹ Actions on structures: Eurocode 1. Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire: EN 1991-1-2:2002. – Brussels: European committee for standardization, 2002. – 61 p.

² Design of steel structures: Eurocode 3. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1993-1-2:2005. – Brussels: European committee for standardization, 2005. – 78 p.

³ Design of aluminium structures: Eurocode 9. Part 1–2: General rules – Structural fire design: EN 1999-1-2:2007. – Brussels: European committee for standardization, 2007. – 61 p.

где λ и c' – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, и удельная объемная изобарная теплоемкость, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$, соответственно.

Граничные условия к уравнению (1) имеют вид [3]:

1) Условие на облучаемой поверхности ($x = 0$), выражающее непрерывность полного потока тепла:

$$-\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_r - \alpha_1 [t(0, \tau) - t_{f1}], \quad (2)$$

где q_r – результирующая плотность потока теплового излучения, падающего на поверхность, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$; α_1 – коэффициент конвективной теплоотдачи с данной поверхности в среду, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$; t_{f1} – температура среды с соответствующей стороны, $^{\circ}\text{C}$.

2) Условиями на противоположной стороне покрытия ($x = h$) являются, соответственно, непрерывность температуры и баланс энергии в ТТТ:

$$t(h, \tau) = t_*(\tau); \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=h} = c_*'' \frac{dt_*(\tau)}{d\tau} + \alpha_2 [t_*(\tau) - t_{f2}], \quad (4)$$

где $t_*(\tau)$ – температура ТТТ, $^{\circ}\text{C}$; c_*'' – удельная поверхностная теплоемкость ТТТ, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$, равная

$$c_*'' = c'_* h_*, \quad (5)$$

где c'_* и h_* – соответственно, удельная объемная изобарная теплоемкость материала ТТТ, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$, и его толщина, м; α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи со свободной поверхности ТТТ, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$; t_{f2} – температура среды с соответствующей стороны (рис. 1), $^{\circ}\text{C}$.

Начальным условием задачи (1)–(5) взято однородное распределение температуры в покрытии и ТТТ ($0 \leq x \leq h$):

$$t(x, 0) = t_0, \quad (6)$$

где t_0 – считающаяся известной начальная температура, $^{\circ}\text{C}$.

Напомним, что тело является термически тонким, если можно пренебрегать изменением температуры в его пределах. В нашем случае это требование обеспечивается выполнением условия малости критерия Био задачи теплоотдачи ТТТ во внешнюю среду:

$$Bi_* = \frac{\alpha_2 h_*}{\lambda_*} \ll 1, \quad (7)$$

где λ_* – коэффициент теплопроводности материала ТТТ, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

Задача (1)–(5) в случае неизменности величин a , λ , c'_* , q_r , α_1 , α_2 , t_{f1} , t_{f2} решается с помощью преобразования Лапласа, проведенного по временной переменной нестационарного поля $t(x, \tau)$ [3]. В результате происходит переход к изображениям по Лапласу. Последние удовлетворяют линейной системе обыкновенных дифференциальных уравнений относительно пространственной переменной x . Методика решения таких систем широко известна, в связи с чем мы опустим выкладки. Результат для интересующего нас изображения по Лапласу разности температур ТТТ

$$t_L(x, s) \equiv \int_0^{\infty} [t(x, \tau) - t_0] \exp(-s \tau) d\tau \quad (8)$$

имеет вид

$$t_{*L}(s) = \frac{Bi_1(t_{\max 1} - t_0) + \left(ch(\varphi) + Bi_1 \frac{sh(\varphi)}{\varphi} \right) Bi_2(t_{f2} - t_0)}{D(s)}, \quad (9)$$

где

$$D(s) = s \left([Bi_1 + Bi_2 + C\varphi^2] ch(\varphi) + [Bi_1 Bi_2 + (1 + C Bi_1)\varphi^2] \frac{sh(\varphi)}{\varphi} \right). \quad (10)$$

В формулах (9)–(10) использована безразмерная переменная

$$\varphi \equiv \sqrt{s\tau_0}, \quad (11)$$

в записи которой фигурирует характерное время прогрева покрытия

$$\tau_0 = \frac{h^2}{a}. \quad (12)$$

При записи соотношений (9), (10) использованы обозначения:

1) критерий Био для задачи теплоотдачи покрытия

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 h}{\lambda}, \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 h}{\lambda}; \quad (13)$$

2) отношение поверхностных теплоемкостей слоев ТТТ и покрытия

$$C = \frac{c_*''}{c''} = \frac{c_*' h_*}{c' h}, \quad (14)$$

где c'' – удельная поверхностная теплоемкость покрытия, Дж·м⁻²·К⁻¹:

$$c'' = c' h; \quad (15)$$

3) эффективная температура горячей среды

$$t_{\max 1} = \frac{q_r}{\alpha_1} + t_{f1}. \quad (16)$$

Применение обратного преобразования Лапласа к выражению (9) дает результат

$$t_*(\tau) - t_0 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Bi_1(t_{\max 1} - t_0) + Bi_2(t_{f2} - t_0) \left(ch(\varphi_n) + Bi_1 \frac{sh(\varphi_n)}{\varphi_n} \right)}{\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n}} e^{s_n \tau}, \quad (17)$$

где суммирование производится по корням s_n характеристического уравнения

$$D(s) = 0. \quad (18)$$

Из-за позитивности всех коэффициентов в выражении (10) уравнение (18) не имеет действительных корней. С целью оперирования действительными параметрами сделаем замену переменных от φ к μ :

$$\varphi = i\mu, \quad (19)$$

где $i = \sqrt{-1}$.

В этих переменных характеристическое уравнение (18) принимает вид:

$$\operatorname{tg} \mu = -\mu \frac{Bi_1 + Bi_2 - C\mu^2}{Bi_1 Bi_2 - (1 + C Bi_1)\mu^2}. \quad (20)$$

Отметим, что уравнение (20) имеет решение $\mu = \mu_0 = 0$, соответствующее решению $s = s_0 = 0$ уравнения (18). Структура уравнения (20) такова, что, если μ_n является решением этого уравнения, то и $-\mu_n$ – решение. Последнее означает, что для учета всех решений s_n ($n = 1, 2, \dots$) уравнения (18) достаточно рассмотреть все положительные решения μ_n уравнения (20). Также отметим, что согласно формулам (11) и (19) выполняется соотношение

$$s_n = -\frac{\mu_n^2}{\tau_0}. \quad (21)$$

Расположение корней характеристического уравнения (20) можно проиллюстрировать нанесенными на одно поле графиками двух функций (рис. 2):

$$y_1(\mu) = \operatorname{tg} \mu; \quad (22)$$

$$y_2(\mu) = -\mu \frac{Bi_1 + Bi_2 - C\mu^2}{Bi_1 Bi_2 - (1 + C Bi_1)\mu^2}. \quad (23)$$

Абсциссы точек пересечения графиков функций $y_1(\mu)$ и $y_2(\mu)$ совпадают с корнями уравнения (20).

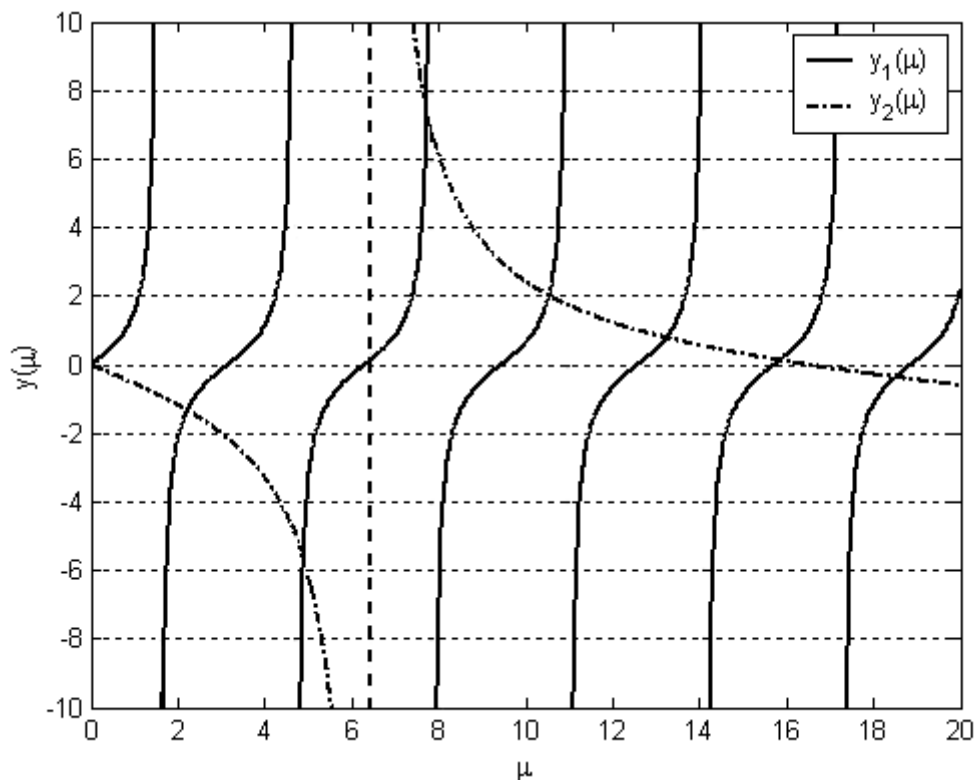


Рисунок 2. – Графики составляющих характеристического уравнения (20) (при $Bi_1 = 2$; $Bi_2 = 25$; $C = 0,1$)

В каждом из периодов $\omega(n) = ((n - 0,5)\pi; (n + 0,5)\pi)$, где n – целое число, периодическая функция $y_1(\mu)$ монотонно возрастает от $-\infty$ к $+\infty$. Функция $y_2(\mu)$ не имеет конечных разрывов. Из двух предыдущих утверждений вытекает, что в каждом из интервалов $\omega(n)$ функции $y_1(\mu)$ и $y_2(\mu)$ пересекаются хотя бы один раз.

Уточним последнее утверждение. Для этого введем положительную координату μ_b точки разрыва функции $y_2(\mu)$. Согласно определению функции $y_2(\mu)$ (23)

$$\mu_b = \sqrt{\frac{Bi_1 Bi_2}{1 + C Bi_1}}. \quad (24)$$

Из характера монотонности функций $y_1(\mu)$ и $y_2(\mu)$ следует:

а) если точка $\mu_b \notin \omega(n)$, то в интервале $\omega(n)$ существует только одна точка пересечения функций $y_1(\mu)$ и $y_2(\mu)$, что дает один корень уравнения (20);

б) если $\mu_b \in \omega(n)$ и $n \neq 0$, то в интервале $\omega(n)$ существуют две точки пересечения функций $y_1(\mu)$ и $y_2(\mu)$, что дает два корня уравнения (20); меньший из этих корней $\mu^<$ находится в интервале $\mu^< \in ((n - 0,5)\pi; \mu_b)$, больший корень $\mu^>$ попадает в интервал $\mu^> \in (\mu_b; (n + 0,5)\pi)$;

в) если $\mu_b \in \omega(0)$, то в неотрицательной части интервала $\omega(0)$ кроме корня $\mu_0 = 0$ существует корень $\mu_1 > 0$ уравнения (20); корень μ_1 принадлежит интервалу $\mu_1 \in (\mu_b; 0,5\pi)$.

Ненулевые корни уравнения (20) являются функциями четырех переменных: $\mu_n = \mu(n, Bi_1, Bi_2, C)$. Численные значения корней находились с использованием стандартных компьютерных программ. (Из-за того, что количество переменных превышает 2, графическое или табличное представления значений μ_n нецелесообразно.)

Отметим важную особенность зависимости величин μ_n от n , которая является следствием расположения последовательных корней μ_n и μ_{n+1} большей частью в соседних областях ω . Из-за того, что соседние области ω сдвинуты на расстояние π , реализуется оценка

$$\mu_n = (n + \delta n)\pi, \quad (25)$$

в которой поправка $|\delta n| < 1$. Такая ситуация зачастую позволяет в сумме (17) ограничиться небольшим количеством первых слагаемых.

Согласно соотношению (17) при определении величины температуры надо рассчитывать безразмерную величину $\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n}$. Опираясь на соотношения (10), (11) и (19), можно показать, что

$$\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_0=0} = Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 Bi_2; \quad (26)$$

$$\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n \neq 0} = \frac{1}{2} \cos \mu_n (Bi_1 Bi_2 - [1 + 2C + C Bi_1] \mu_n^2) - \frac{1}{2} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} (Bi_1 Bi_2 + [1 + Bi_1 + Bi_2 + C Bi_1] \mu_n^2 - C \mu_n^4). \quad (27)$$

Придадим безразмерный (критериальный) вид выражению (17). Для этого введем:

1) относительную избыточную температуру ТТТ

$$\theta \equiv \frac{t_*(\tau) - t_0}{t_{\max 1} - t_0}; \quad (28)$$

2) относительную избыточную температуру среды со второй стороны ТТТ

$$\theta_{f2} \equiv \frac{t_{f2} - t_0}{t_{\max 1} - t_0}; \quad (29)$$

3) безразмерное время процесса (критерий Фурье):

$$Fo \equiv \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{a\tau}{h^2}. \quad (30)$$

В этих переменных выражение (17) приобретает полностью безразмерный вид:

$$\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \sum_{n=0}^{\infty} \theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}). \quad (31)$$

Слагаемые ряда (31) экспоненциально убывают со временем

$$\theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = A_n(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (32)$$

а

$$A_n(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + Bi_2 \theta_{f2} \left(\cos(\mu_n) + Bi_1 \frac{\sin(\mu_n)}{\mu_n} \right)}{\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n}}, \quad (33)$$

где знаменатель дроби (33) описан формулой (27).

На рисунке 3 приведен график зависимости от Fo слагаемых ряда (31) для нескольких начальных значений n и частичных сумм ряда (31) θ_{sum} для N начальных слагаемых:

$$\theta_{sum}(N, Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} \theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}). \quad (34)$$

Графики на рисунке 3 показывают, что если не интересоваться диапазоном малых значений времени $Fo \ll 1$, то при расчетах θ достаточно использовать два первых слагаемых ряда (31). Последнее обстоятельство объясняется существованием оценки (25) и множителем $\exp(-\mu_n^2 Fo)$ в выражении (32). Так, в случае, изображенном на рисунке 3 ($Bi_1 = 2$; $Bi_2 = 25$; $C = 0,1$), $\mu_1 \approx 2,215$; $\mu_2 \approx 4,888$; $\mu_3 \approx 7,722$, что при $Fo = 0,5$ дает оценки:

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} < \exp[-(\mu_2^2 - \mu_1^2) Fo] \approx \exp(-19,0 \cdot 0,5) \approx 7,5 \cdot 10^{-5};$$

$$\frac{\theta_3}{\theta_2} < \exp[-(\mu_3^2 - \mu_2^2)Fo] \approx \exp(-35,7 \cdot 0,5) \approx 1,8 \cdot 10^{-8}.$$

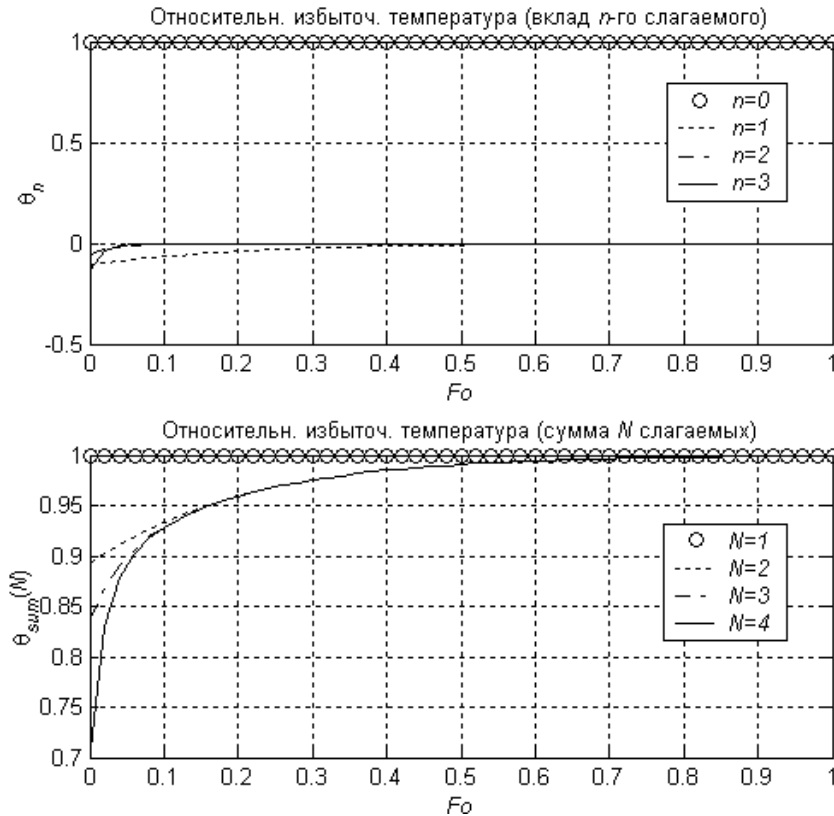


Рисунок 3. – Графики зависимости слагаемых ряда (31) θ_n и частичных сумм этого ряда θ_{sum} от критерия Fo при $Bi_1 = 2$; $Bi_2 = 25$; $C = 0,1$; $\theta_{f2} = 1$

Если, решая задачу пожарной безопасности, задаваться критическим уровнем температуры ТТТ t_{cr} или ее безразмерным аналогом

$$\theta_{cr} \equiv \frac{t_{cr} - t_0}{t_{max1} - t_0}, \quad (35)$$

эта критическая температура θ_{cr} будет связана с безразмерным временем Fo соотношением [4]

$$\theta_{cr} = \theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}). \quad (36)$$

Зависимость критического значения безразмерного времени Fo_{cr} от критической температуры θ_{cr} можно получить, разрешив уравнение (36) относительно переменной Fo . При достаточно больших временах, когда критерий Фурье Fo больше или порядка единицы, такую операцию можно проделать явно. Как отмечалось ранее, в этом случае от ряда (31) можно оставить два первых слагаемых, и тогда

$$\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = A_0 + A_1 \exp(-\mu_1^2 Fo), \quad (37)$$

где

$$A_0(Bi_1, Bi_2, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + Bi_2 \theta_{f2} (1 + Bi_1)}{Bi_1 + Bi_2 (1 + Bi_1)},$$

а амплитуда $A_1(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2})$ определяется формулой (33). Корень $\mu_1(Bi_1, Bi_2, C)$ характеристического уравнения (20) приходится получать численно. Область его единственности зависит от величины параметра μ_b (24): при $\mu_b \in (0; 0,5\pi)$ корень $\mu_1 \in (\mu_b; 0,5\pi)$; при $\mu_b \in (0,5\pi; 1,5\pi)$ корень $\mu_1 \in (0,5\pi; \mu_b)$; при $\mu_b \in (1,5\pi; +\infty)$ корень $\mu_1 \in (0,5\pi; 1,5\pi)$.

Решая уравнение (36) в области адекватности формулы (37), получим зависимость критического значения безразмерного времени Fo_{cr} от критической температуры θ_{cr} :

$$Fo_{cr} = \frac{1}{\mu_1^2} \ln \left| \frac{A_1}{A_0 - \theta_{cr}} \right| \quad (38)$$

или в размерном виде для предела огнестойкости

$$\tau_{cr} = \tau_0 Fo_{cr} = \frac{h^2}{a} \frac{1}{\mu_1^2} \ln \left| \frac{A_1}{A_0 - \theta_{cr}} \right|. \quad (39)$$

Отметим, что полученные результаты можно использовать при расчете предела огнестойкости защищенных металлических конструкций не только плоского сечения. Т. к. можно считать, что ТТТ на всех свои участках имеет одну и ту же температуру, при его нагреве важна не столько толщина, сколько отношение объема ТТТ к площади поверхности теплообмена, называемое «приведенной толщиной». Это означает, что при расчете предела огнестойкости необходимо вместо толщины защищаемого металлического слоя подставлять приведенную толщину защищаемой конструкции.

Заключение. Рассмотрена защита плоского термически тонкого тела от внешнего теплового воздействия при помощи нанесенного покрытия, представляющего собой плоский однородный слой инертного теплопоглощающего материала. Вопрос сведен к линейной задаче нестационарной теплопроводности с граничными условиями третьего рода на внешних границах системы.

Аналитическое решение задачи представлено в безразмерном (критериальном) виде как зависимость относительной избыточной температуры термически тонкого тела от пяти критериев: 1) критерия Фурье для задачи прогрева теплозащитного слоя; 2) двух критериев Био; 3) отношения поверхностных теплоемкостей покрытия и термически тонкого тела; 4) относительной избыточной температуры среды с необогреваемой стороны. Зависимость температуры термически тонкого тела от времени имеет вид бесконечного ряда, слагаемые которого экспоненциально убывают с ростом времени. Получен явный вид зависимости слагаемых ряда от параметров задачи и решений ее характеристического уравнения. Существенным усложнением характеристического уравнения (по сравнению с ситуацией прогрева одиночного слоя) стало появление зависимости от отношения поверхностных теплоемкостей защитного слоя и термически тонкого тела. Указан явный вид характеристического уравнения и интервалы единственности корней этого уравнения, что значительно упрощает получение численного значения данных корней. Показано, что для большинства расчетов температуры достаточно двух первых членов соответствующего ряда.

На основе найденных соотношений в явном виде получены формулы функциональной зависимости предела огнестойкости от параметров защитного покрытия и термически тонкого тела. Полученные результаты можно использовать при расчете предела огнестойкости защищенных металлических конструкций. Для расширения области применения полученных соотношений на металлические конструкции неплоского сечения необходимо вместо толщины защищаемого металлического слоя использовать его приведенную толщину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голованов, В.И. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T / В.И. Голованов, В.В. Павлов, А.В. Пехотиков // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 11. – С. 8–16. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.
2. Голиков, А.Д. Способ огнезащиты обделки транспортных тоннелей из чугунных тубингов / А.Д. Голиков, Е.Ю. Черкасов, А.И. Данилов, И.А. Сиваков // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 12. – С. 22–29. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29.
3. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
4. Шаршанов, А.Я. О критериях пожарной безопасности / А.Я. Шаршанов // Проблемы пожарной безопасности. – 2018. – Вып 44. – С. 176–182.

**Расчет предела огнестойкости термически тонкого тела,
защищенного поглощающим покрытием**

Calculation of the protection of a thermal thin body protected by an absorbent coating

Шаршанов Андрей Янович

кандидат физико-математических наук, доцент

Национальный университет гражданской
защиты Украины, кафедра специальной
химии и химической технологии, доцент

Адрес: 61023, Украина, г. Харьков,
ул. Чернышевская, 94

e-mail: sharshanov59@gmail.com

Andrey Ya. Sharshanov

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

National University of Civil Defence of Ukraine,
Department of Special Chemistry and Chemical
Technology, Assistant Professor

Address: 61023, Ukraine, Kharkov,
ul. Chernyshevskaya, 94

e-mail: sharshanov59@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-4.400>

CALCULATION OF THE PROTECTION OF A THERMAL THIN BODY PROTECTED BY AN ABSORBENT COATING

Sharshanov A.Ya.

Purpose. The protection of a flat thermally thin body from the heat effect of a fire is considered. Protection is carried out using a flat uniform layer of inert heat absorbing material applied to the body surface. The aim of the work is to find the dependence of the temperature of the protected body on the time of exposure.

Methods. The problem is reduced to a linear task of unsteady heat conduction with boundary conditions of the third kind at the external boundaries of the system. The solution was performed using the Laplace transform of time variable.

Findings. For the first time, an analytical solution of this problem under stationary boundary conditions of the third kind was obtained. It is presented in a dimensionless (critical) form, as the dependence of the relative excess temperature of a thermally thin body on five criteria: 1) the Fourier criterion of the problem of heating the heat-shielding layer; 2) two criteria of Bio; 3) the ratio of the surface heat capacities of the coating and the thermally thin body; 4) relative excess temperature of the medium on the unheated side. The temperature dependence of a thermally thin body on time has the form of an infinite series, the terms of which exponentially decrease with increasing time. An explicit form of the dependence of the terms of the series on the parameters of the problem is obtained. The explicit form of the characteristic equation of the problem and the intervals of uniqueness of the roots of this equation are indicated, which greatly simplifies obtaining the numerical value of these roots. It is shown that for most temperature calculations the first two terms of the corresponding series are sufficient.

Application field of research. Based on the obtained relations, formulas for the explicit functional dependence of the fire resistance on the parameters of the thermally thin body and the protective coating are written. The results obtained allow calculating the fire resistance limit of metal structures with protection. The introduction of the reduced thickness of structures instead of the thickness make it possible to apply the relations to the metal structures of non-flat section.

Keywords: thermally thin body, heat-absorbing coating, non-stationary thermal conductivity, fire resistance limit.

(The date of submitting: July 15, 2019)

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V. Ognezashchita stal'nykh konstruktsiy plitnym materialom PYRO-SAFE AESTUVER T [Fire protection of steel structures with slab material PYRO-SAFE AESTUVER T]. *Fire and Explosion Safety*, 2016. No. 25 (11). Pp. 8–16. (rus) DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.8-16.
2. Golikov A.D., Cherkasov E.Y., Danilov A.I., Sivakov I.A. Sposob ognezashchity obdelki transportnykh tonneley iz chugunnykh tyubingov [Method fire protection of cast iron tunnel lining]. *Fire and Explosion Safety*, 2016. No. 25 (12). Pp. 22–29. (rus) DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.22-29.
3. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1967. 600 p. (rus)
4. Sharshanov A.Ya. O kriteriyakh pozharnoy bezopasnosti [On the criteria for fire safety]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, 2018. No. 37. Pp. 166–172. (rus)