

*М. М. Семерак, д-р техн. наук, професор, І. С. Юнашов, В. М. Байтала, В. В. Чернецький
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ МАСИВНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗУМОВЛЕНЕ ТЕПЛОВИМ ПОТОКОМ ПОЛУМ'Я ПОЖЕЖІ

Досліджено нестационарні температурні поля в масивних конструкціях зумовлені тепловим потоком. Розглянуто випадок, коли масивна конструкція нагрівається від факела полум'я пожежі. При моделюванні процесу нагрівання враховані граничні умови другого роду. Використовуючи перетворення Лапласа одержано аналітичні вирази для дослідження температурного поля залежно від теплофізичних параметрів матеріалу конструкції. Досліджено нестационарне температурне поле металевої, бетонної і цегляної конструкції. Показано, що теплофізичні параметри та ступінь чорноти значно впливають на величину температурного поля.

Ключові слова: температурне поле, теплообмін, теплові потоки.

Постановка проблеми. Проблемі теплових впливів на будівельні конструкції та визначення границь їх вогнестійкості приділяється багато уваги, оскільки методики розрахунку конструкцій враховують температурні фактори з метою забезпечення життєдіяльності людей за умов пожеж та аварій в будівлях.

При будівництві масивних бетонних та залізобетонних споруд (корпусів ядерних реакторів, градирень, резервуарів, промислових цехів, сховищ та ін.) часто виникають тріщини ще до початку експлуатації. Причиною утворення тріщин є температурні градієнти і температурні деформації [1-4]. Ці градієнти і деформації є неминучими в масивних бетонних конструкціях, які розігріваються в молодому віці бетону від екзотермії, а потім вистигають із плином часу. Вони властиві також спорудам на відкритому повітрі, де зазнають атмосферних впливів періодичного характеру.

Особлива увага приділяється дослідженню вогнестійкості конструкцій в умовах пожежі. Під час пожежі продукти горіння нагріваються до температури 1200 °С і більше. Конструкції, які знаходяться в осередку пожежі інтенсивно нагріваються. Спочатку конвективні і радіаційні теплові потоки нагрівають поверхні, конструкції. З плином часу прогрів поширюється на внутрішні шари. При досягненні критичної температури конструкція втрачає вогнестійкість. Показник вогнестійкості визначається величиною критичної температури до якої нагрівається конструкція в цілому, або окремі її поверхні. Такою температурою для металевих конструкцій, при якій різко знижується границя міцності, є 500 – 550 °С. Для бетонних конструкцій крім значення температури велику роль відіграє градієнт температури. В металах коефіцієнт теплопровідності становить $\lambda = 50 \frac{Вт}{м \cdot К}$ і

більше. Для бетону і цегляної стінки він відповідно дорівнює $1,2 \frac{Вт}{м \cdot К}$ і $0,5 \frac{Вт}{м \cdot К}$. Металеві конструкції прогріваються швидше від бетонних і величина температурного градієнта в металі є меншою. Тому аналітичні дослідження нестационарних температурних полів в будівельних конструкціях є актуальною задачею.

Дослідимо температурне поле в масивній плоскій стінці при дії теплового потоку. При аналітичному дослідженні тіло змодельємо півпростором. Початок координат розмістимо на поверхні, а координатну вісь спрямуємо углиб тіла. Нехай температура тіла дорівнює t_0 . В початковий момент часу ($\tau = 0$) поверхня почала нагріватись постійним тепловим потоком q_c .

Математично задача запишеться таким чином:

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

де $t(x, \tau)$ – температура тіла, $^{\circ}\text{C}$; $a = \frac{\lambda(t)}{C_v \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; C_v – теплоємність при сталому об'ємі, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

ρ – густина, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; Вираз (1) є диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності другого порядку.

Для знаходження розв'язку рівняння (1) необхідно задати одну початкову і дві граничні умови.

1. Початкова умова:

$$t(x, 0) = t_0 \text{ при } \tau = 0; \quad (2)$$

2. Граничні умови:

$$t(\infty, \tau) = t_0 \text{ при } x \rightarrow \infty; \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + q_c = 0. \quad (4)$$

Продиференціюємо рівняння (1) по x і отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] = a \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]. \quad (5)$$

Замість змінної T введемо нову змінну q (густина теплового потоку на поверхні тіла), яка дорівнює:

$$q(x, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}. \quad (6)$$

Тоді диференційне рівняння (5) можна записати так:

$$\frac{\partial q(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 q(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (7)$$

Розв'язок рівняння (7), з врахуванням початкової та граничних умов, має вигляд:

$$\frac{q(x, \tau)}{q_c} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}}. \quad (8)$$

Підставимо у вираз (6) замість $q(x, \tau)$ відповідний вираз із (8) та проінтегруємо від x до ∞ . Отримаємо $T(x, \tau)$:

$$T(x, \tau) = \frac{q_c}{\lambda} \cdot \int_x^{\infty} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} dx = \frac{2q_c}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} \cdot \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}}, \quad (9)$$

де $\operatorname{ierfc}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \cdot \operatorname{erfc}(u)$,

$$T(x, \tau) = \frac{q_c}{\lambda} \cdot \int_x^{\infty} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} dx = \frac{2q_c}{\lambda} \sqrt{a \cdot \tau} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a \cdot \tau}} - \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} \right)$$

При дослідженні теплообміну випромінювання між факелом і будівельними конструкціями необхідно визначити долю енергії випромінювання факела, яка поглинається конструкцією. Якщо факел рухається вгору паралельно колоні, то тепловий потік визначається за формулою, [3]:

$$q = \varepsilon_{36} \cdot 5.67 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \phi_{2-1}, \quad (10)$$

де $\varepsilon_{36} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$ – зведений ступінь чорноти системи полум'я – конструкція; ε_1 – ступінь чорноти поверхні коконструкції; ε_2 – ступінь чорноти факела полум'я; ϕ_{2-1} – частина повної енергії випромінювання факела, яка поглинається поверхнею несучої конструкції (кутовий коефіцієнт випромінювання); T_1 – температура поверхні конструкції, К; T_2 – температура факела, К.

Якщо ширина факела дорівнює c , ширина конструкції b , а віддаль між ними однакова a , то кутовий коефіцієнт випромінювання визначається із залежності (11) [3]:

$$\phi_{2-1} = \frac{1}{2 \cdot \frac{c}{a}} \left(\sqrt{\left(\frac{b}{a} + \frac{c}{a} \right)^2 + 4} - \sqrt{\left(\frac{b}{a} - \frac{c}{a} \right)^2 + 4} \right) \quad (11)$$

За виразом (11) проведені розрахунки кутового коефіцієнта випромінювання для полум'я з розмірами $c = 3$ м, $b = 1,8$ м. Результати досліджень зображені графічно на рис. 1.

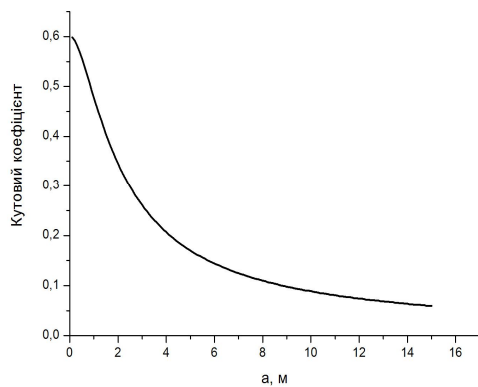


Рис. 1. Зміна величини кутового коефіцієнта залежно від віддалі між факелом і конструкції

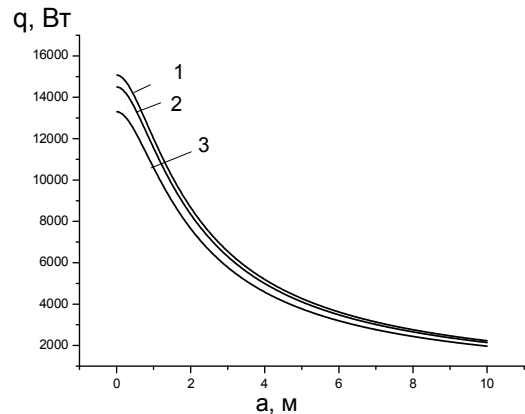


Рис. 2. Зміна величини теплового потоку залежно від віддалі до факела: 1 – метал, 2 – цегла, 3 – бетон

Враховуючи одержані результати досліджено тепловий потік (10), який падає на поверхню металевої, цегляної та бетонної стінки. При цьому прийнято ступінь чорноти: металу – 0,95; бетону – 0,8; цегли – 0,9. Результати розрахунків зображено графічно на рис. 2.

Знаючи величину теплового потоку, зумовленого пожежею, дослідимо температурне поле по товщині плоскої стінки залежно від часу.

За формулою (9) проведемо розрахунки температурного поля в цегляній, бетонній та металевій стінках, для яких прийняті такі теплофізичні характеристики матеріалів:

$$\begin{aligned} & \text{– металу } \lambda = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; C_v = 450 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\ & \text{– бетону } \lambda = 1,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; C_v = 850 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho = 2200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\ & \text{– цегли } \lambda = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; C_v = 925 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \rho = 1600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \end{aligned} \quad (12)$$

Результати розрахунків зображено графічно на рис. 3. На рисунках показано температурне поле конструкції залежно від координати x в різні моменти часу: 1 – 1 хв, 2 – 5 хв, 3 – 5 хв, 4 – 10 хв, 5 – 20 хв, 6 – 30 хв.

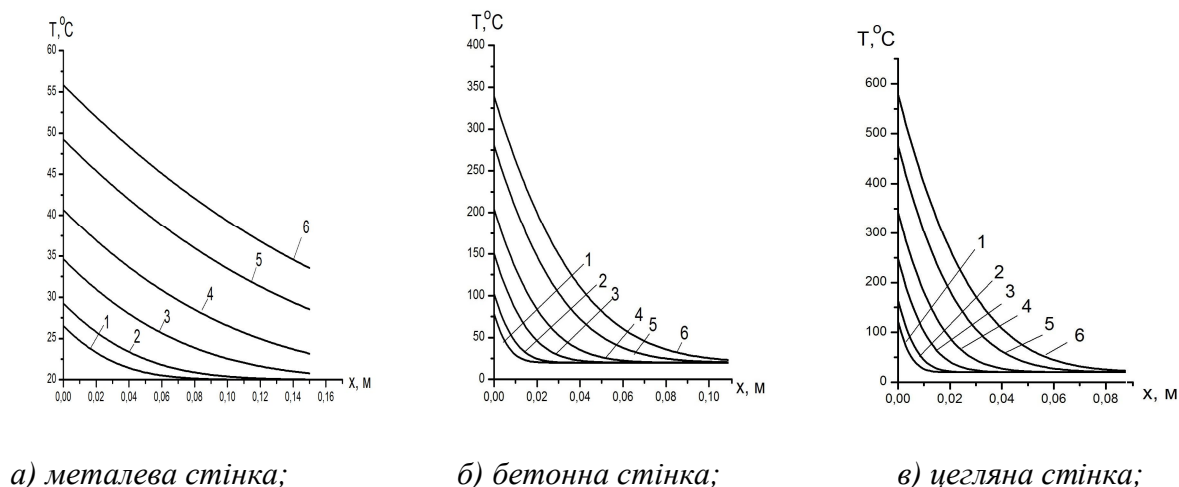


Рис. 3. Графіки температурних полів у стінках при $q = 10 \text{ кВт}$

Аналіз графічних залежностей нагрівання конструкцій (рис. 3) показує, що в конструкціях з малим значенням коефіцієнта теплопровідності її поверхні нагріваються до більшої величини температури (рис. 1 а,б), але тепло проникає на меншу глибину ніж в конструкціях з більшим значенням λ (рис. 1 в).

На підставі аналізу одержаних результатів доходимо висновку:

1. Тепловий потік від полум'я пожежі поглинається краще поверхнею конструкції, яка має більший ступінь чорноти (рис. 2).
2. Поверхня конструкції, яка має меншу величину коефіцієнта теплопровідності нагрівається до більшої температури (рис. 3).
3. При більшому коефіцієнті теплопровідності глибина прогріву конструкції є більшою (рис. 3).

Література:

1. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. – М. : Стройиздат, 1973 – 368 с.
2. Кирилов А. П. Железобетонные корпуса ядерных реакторов. – М. : Энергоатомиздат, 1988 – 248 с.
3. Р. Зигель, Дж. Хоуелл. Теплообмен излучением. – М.: «Мир», 1975 – 936 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М. : «Высшая школа», 1967 – 600 с.

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБУСЛОВЛЕННОЕ ИНТЕНСИВНЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ ПЛАМЕНИ ПОЖАРА

В работе исследованы нестационарные температурные поля в массивных конструкциях при их нагреве. Рассмотрен случай, когда массивная конструкция нагревается от факела пламени пожара. При моделировании процесса нагрева учтены предельные условия второго рода. Используя превращение Лапласа получены аналитические выражения для исследования температурного поля в зависимости от теплофизических параметров материала конструкций. Исследовано нестационарное температурное поле металлических, бетонных и кирпичных конструкций. Показано, что теплофизические параметры и интенсивность теплообмена значительно влияют на величину температурного поля.

Ключевые слова: температурное поле, температурный, теплообмен, тепловые потоки.

M.M. Semerak, I.S. Yunashov, V.M. Baytala, V.V. Chernetskyi

THE TEMPERATURE FIELD OF MASSIVE CONSTRUCTIONS CAUSED BY INTENSIVE HEATING

In this paper non stationary temperature fields in massive constructions during their heating are researched. A case, when a massive construction is heated on the surface by the environment with stable temperature is examined. During modelling of heating process the boundary conditions of the third kind were taken into account. Using Laplace transformation, the analytical expressions for research of temperature field depending on the thermophysical parameters of construction materials were received. Non stationary temperature field and temperature gradient in metal, concrete and brick constructions, depending on time and heat exchange intensity were researched. It was demonstrated that thermophysical parameters and heat exchange intensity have significant impact on temperature, temperature gradient indices and size of conductive heat current flowing through construction surface.

Keywords: temperature field, temperature gradient, heat exchange, thermal streams.