

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 КОНСТРУКЦІЙ ЗУМОВЛЕНЕ ІНТЕНСИВНИМ НАГРІВАННЯМ

В роботі досліджено нестационарні температурні поля в масивних конструкціях при їх нагріванні. Розглянуто випадок, коли масивна конструкція нагрівається по поверхні середовищем температура t якого постійна. При моделюванні процесу нагрівання враховані граничні умови третього роду. Використовуючи перетворення Лапласа одержано аналітичні вирази для дослідження температурного поля залежно від теплофізичних параметрів матеріалу конструкцій. Досліджено нестационарне температурне поле і температурний градієнт в металевих, бетонних і цегляних конструкціях залежно від часу та інтенсивності теплообміну. Показано, що теплофізичні параметри та інтенсивність теплообміну значно впливають на величину температури, температурного градієнта, а також на величину кондуктивного теплового потоку, що проходить через поверхню конструкції.

Ключові слова: температурне поле, температурний градієнт, теплообмін, теплові потоки.

Постановка проблеми. Проблемам теплових впливів на будівельні конструкції та визначення границь їх вогнестійкості останнім часом приділяється багато уваги, оскільки сучасні методики розрахунку конструкцій враховують температурні фактори з метою забезпечення безпеки 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 масових бетонних конструкціях, які розігріваються в молодому віці бетону від екзотермії, а потім вистигають із плином часу. Вони властиві також спорудам на відкритому повітрі і зазнають атмосферних впливів періодичного характеру.

Особлива увага приділяється дослідженню вогнестійкості конструкцій в умовах пожежі. Під час пожежі продукти горіння нагріваються до температури $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $500 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 $0,5 \frac{Вт}{м \cdot К}$. Тому металеві конструкції прогріваються швидше від бетонних і величина температурного градієнта в металі є меншою. Отож аналітичні дослідження нестационарних температурних полів в будівельних конструкціях є актуальною задачею.

Дослідимо температурне поле та градієнт температури в масивному тілі при раптовій зміні температури зовнішнього середовища. При аналітичному дослідженні тіло змодельовано півпростором. Початок координат розмістимо на поверхні тіла, а координатну вісь спрямуємо в його глибину. Нехай температура тіла рівна t_0 . В початковий момент часу ($\tau = 0$) температура середовища, яке омиває конструкцію, збільшується до величини t_c ($t_0 < t_c$) і далі залишається постійною. Між тілом і середовищем відбувається теплообмін за законом Ньютона.

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, яка досліджується, $^{\circ}C$; $a = \frac{\lambda(t)}{c_v \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, $\frac{m^2}{c}$; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{Вт}{м \cdot K}$; c_v – теплоємність при сталому об'ємі, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$; ρ – густина, $\frac{кг}{м^3}$. Вираз (1) є диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності другого порядку.

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

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

$$t(x, 0) = t_0 \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha \cdot [t_c - t(0, \tau)]_{x=0}, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт теплообміну між поверхнею конструкції і зовнішнім середовищем, температура якого рівна t_c , $\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$.

Застосовуючи перетворення Лапласа до рівняння (1) і умов (2)-(4), одержуємо розв'язок рівняння (1), [5]:

$$\frac{t(x, \tau) - t_0}{t_c - t_0} = 1 - \operatorname{erf} \xi - \left\{ \exp[Bi + \eta] \cdot [1 - \operatorname{erf}(\xi + \sqrt{\eta})] \right\}, \quad (5)$$

де $\xi = \frac{x}{\sqrt{4a\tau}} = \frac{1}{2\sqrt{Fo}}$; $\eta = \frac{\alpha^2 a \tau}{\lambda^2} = Bi^2 \cdot Fo$; $Fo = \frac{a\tau}{x^2}$ – критерій Фур'є, $Bi = \frac{\alpha x}{\lambda}$ – критерій Біо;

$\operatorname{erf} \xi = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-y^2} dy$ – функція помилок Гаусса.

За формулами (5) проведемо розрахунки температурного поля в цегляній, бетонній та металевій стінках, для яких прийняті такі теплофізичні характеристики матеріалів:

- цегли $\lambda = 0,5 \frac{Вт}{м \cdot K}$; $C_v = 925 \frac{Дж}{кг \cdot K}$; $\rho = 1600 \frac{кг}{м^3}$;
- бетону $\lambda = 1,2 \frac{Вт}{м \cdot K}$; $C_v = 850 \frac{Дж}{кг \cdot K}$; $\rho = 2200 \frac{кг}{м^3}$;
- металу $\lambda = 50 \frac{Вт}{м \cdot K}$; $C_v = 450 \frac{Дж}{кг \cdot K}$; $\rho = 7800 \frac{кг}{м^3}$;

Температуру зовнішнього середовища прийнято рівною $t_c = 500^{\circ}C$, а $t_0 = 20^{\circ}C$. Результати розрахунків зобразимо на графіках (рис. 1,2).

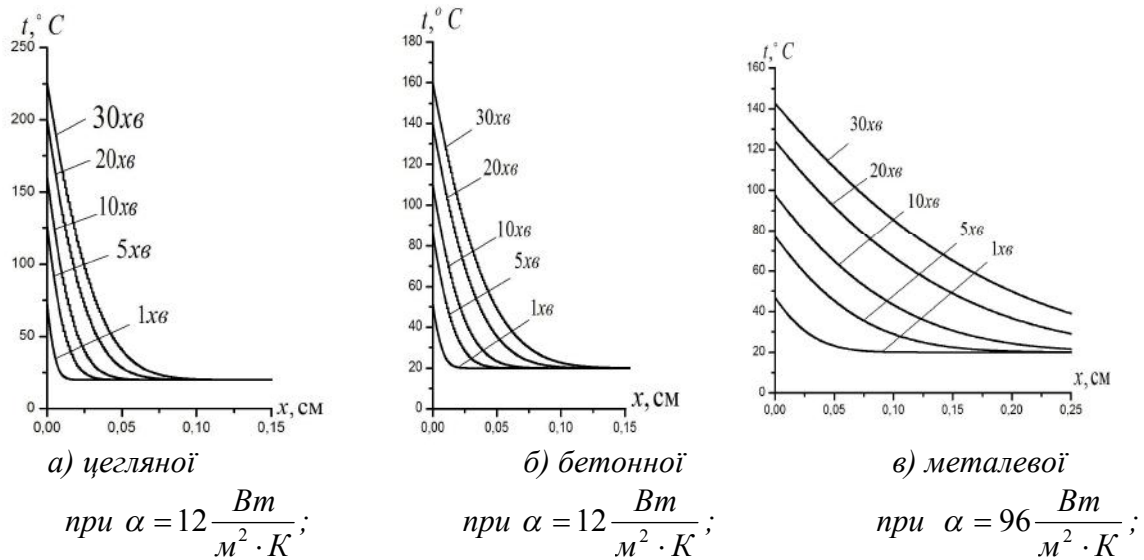


Рис. 1. Графіки температурних полів

Аналіз графічних залежностей нагрівання конструкцій (рис. 1) 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 рис. 2 показано зміну величини температури на поверхні конструкції $x=0$ залежно від коефіцієнта теплообміну α між поверхнею конструкції і зовнішнім середовищем та конкретних значень часу τ .

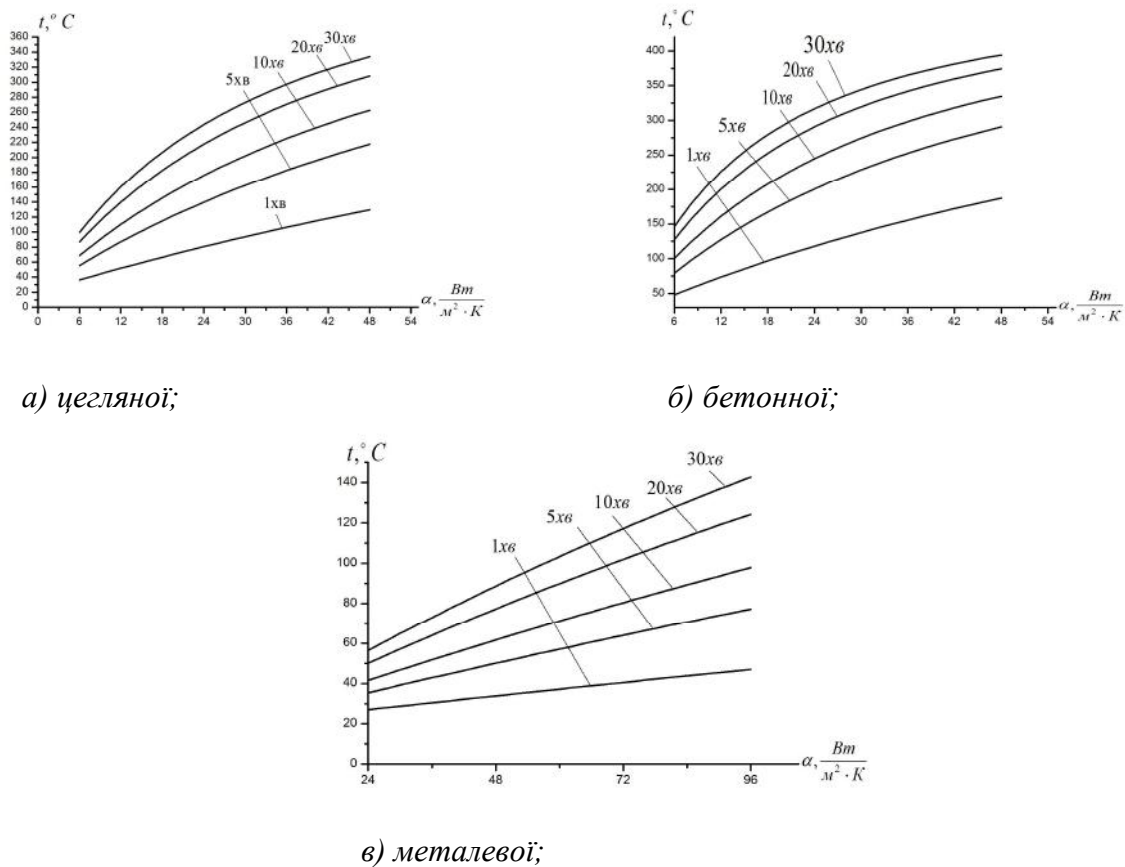


Рис. 2. Залежність значення температури від коефіцієнта теплообміну на поверхні конструкції

Аналіз графіків показує, що збільшення інтенсивності теплообміну між поверхнею конструкції, виготовленої із цегли або бетону, призводить до значного збільшення величини температури на її поверхні (рис. 2 а,б). В металевій конструкції інтенсивність нагріву поверхні значно менша (рис. 2 в).

Диференціюючи вираз (5) по x і приймаючи $x=0$, одержимо вираз для градієнта температури на поверхні конструкції $x=0$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (t_c - t_0) \cdot \exp\left[\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot a \cdot \tau\right] \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right)\right]. \quad (6)$$

На рис. 3 показано зміну величини градієнта температури з плином часу для конкретних значень коефіцієнта теплообміну між середовищем і поверхнею конструкції.

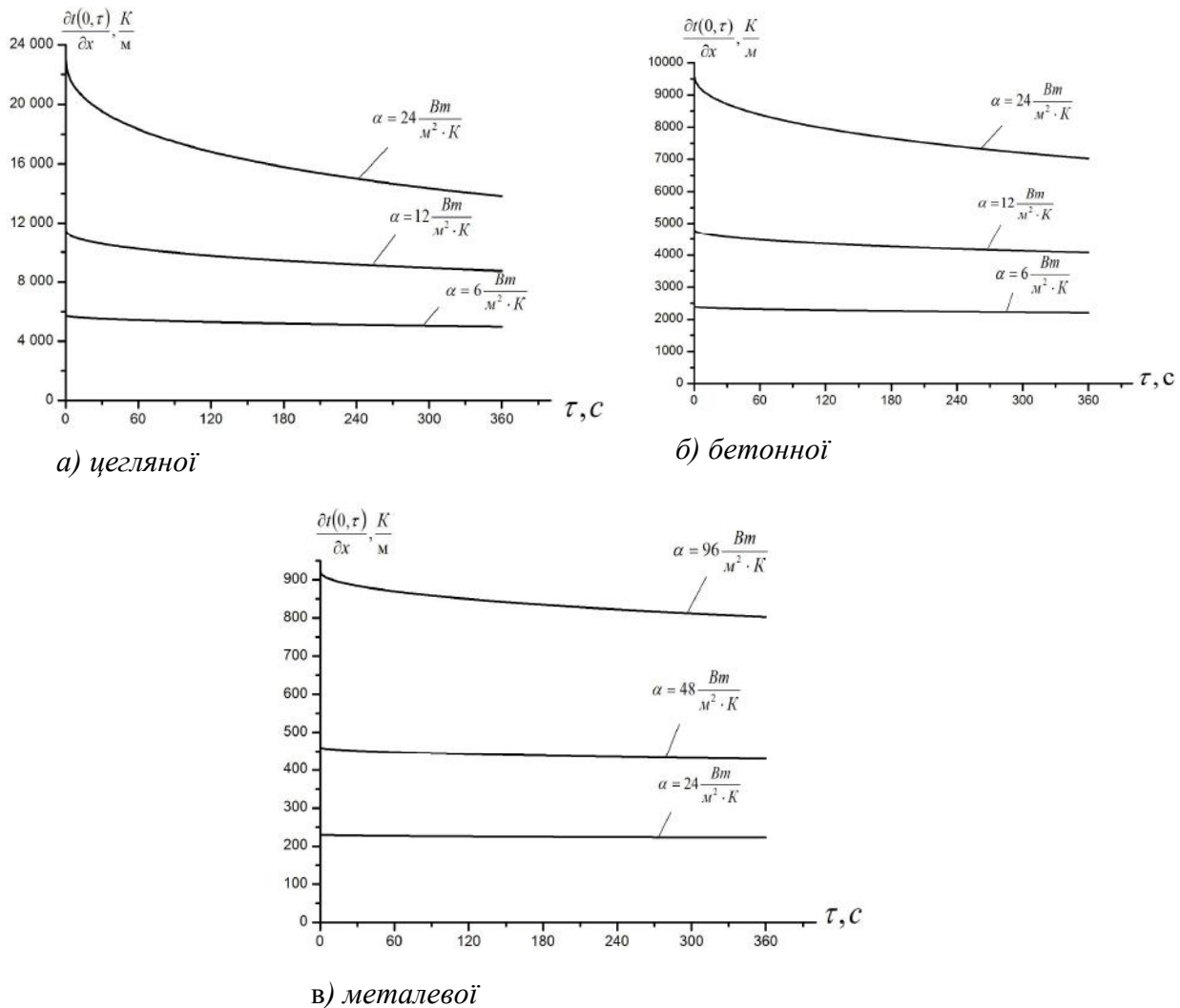


Рис. 3. Градієнт температури на поверхні конструкції

Аналіз графіків показує, що значний вплив на величину температурного градієнта має значення коефіцієнта теплопровідності λ , який залежить від матеріалу конструкції. Встановлено, що зміна температурного градієнта з плином часу τ є незначною.

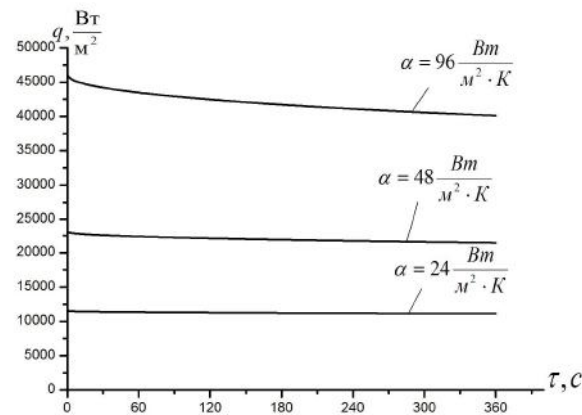
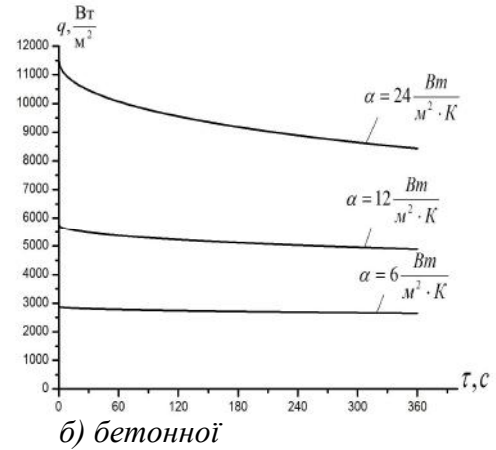
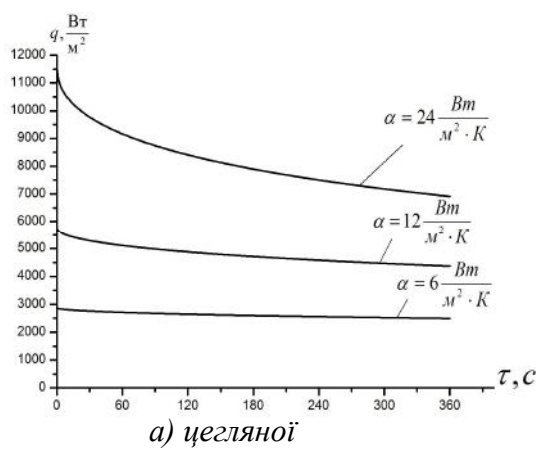
Густина теплового потоку через поверхню тіла дорівнює:

$$q = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x}. \quad (7)$$

Підставляючи вираз (6) в формулу (7) одержимо густину теплового потоку на поверхні $x=0$

$$q = \alpha(t_c - t_o) \cdot \exp\left[\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot a \cdot \tau\right] \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right)\right). \quad (8)$$

За формулами (8) проведені розрахунки теплового потоку в цегляній, бетонній і металевій конструкціях. Результати розрахунків зображені графічно на рис. 4.



в) металевій

Рис. 4. Густина теплового потоку на поверхні

$x=0$

Аналіз зображених на рис. 4. графічних залежностей показує, що тепловий потік, який проходить через поверхню конструкції, значною мірою залежить від коефіцієнта теплообміну α . Із збільшенням часу нагрівання тепловий потік зменшується внаслідок зменшення різниці температур між навколишнім середовищем і поверхнею конструкції.

Висновки:

1. Досліджено особливості нестационарного нагріву масивних будівельних конструкцій. Показано, що процес нагріву залежить від теплофізичних характеристик матеріалів. При малих значеннях теплопровідності матеріалів конструкції її поверхня нагрівається більш інтенсивно ніж в конструкціях з великим значенням теплопровідності. Зате тепло в другому випадку проникає на більшу глибину.

2. Величина градієнту температури на поверхні конструкції залежить від теплопровідності і коефіцієнта теплообміну. В конструкціях з більшим коефіцієнтом теплопровідності він зменшується, а при збільшенні теплообміну він зростає.

Список літератури:

1. **Александровский С. В.** Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. - М. : Стройиздат, 1973 – 368с.
2. **Кирилов А. П.** Железобетонные корпуса ядерных реакторов. – М. : Энергоатомиздат, 1988 – 248с.
3. **Термомеханика:** Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1965-1976 гг. / Ю.М. Коляно, М.М. Семерак, О.Я. Яворская. – Львов: изд-во Львовская научная библиотека им. В. Стефаника АН УССР, 1979. – Ч. I, II. – Кн. I. – 360 с. – Кн. II. – 477 с.
4. **Термомеханика: Библиографический** указатель отечественной и иностранной литературы за 1977-1981 гг. В трех книгах / О.Я. Яворская, Ю.М. Коляно, М.М. Семерак. – Львов: изд-во Львовская научная библиотека им. В. Стефаника АН УССР, 1986. – Кн. I -354 с., Кн. II. – 364 с., Кн. III. – 397 с.
5. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. – М. : «Высшая школа», 1967 – 600с.

М. М. Семерак, И. С. Юнашов, В. М. Байтала, В. В. Чернецкий

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОБУСЛОВЛЕНО ИНТЕНСИВНЫМ НАГРЕВОМ

В работе исследованы нестационарные температурные поля в массивных конструкциях при их нагреве. Рассмотрен случай, когда массивная конструкция нагревается по поверхности средой температура t которой постоянная. При моделировании процесса нагрева учтены предельные условия третьего рода. Используя превращение Лапласа получены аналитические выражения для исследования температурного поля в зависимости от теплофизических параметров материала конструкций. Исследовано нестационарное температурное поле и температурный градиент в металлических, бетонных и кирпичных конструкциях в зависимости от времени и интенсивности теплообмена. Показано, что теплофизические параметры и интенсивность теплообмена значительно влияют на величину температуры, температурного градиента, а также на величину кондуктивного теплового потока, проникающего сквозь поверхность конструкции.

Ключевые слова: температурное поле, температурный градиент, 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 of massive constructions during their heating are researched. A case, when a massive construction is heated on the surface by the environment of stable temperature is examined. During modeling of heating process the boundary conditions of third kind are taken into account. Using Laplace transformation, the analytical expressions for research of temperature field depending on the thermophysical parameters of construction materials are received. Non stationary temperature field and temperature gradient in metal, concrete and brick constructions, depending on time and heat exchange intensity are researched. It is 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.

Key words: temperature field, temperature gradient, heat exchange, thermal flows.

