

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Г. В. КАРПЕНКА

**МЕХАНІКА І ФІЗИКА  
РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ  
МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ**

Збірник наукових праць

**Випуск 10**

За загальною редакцією Й. Й. Лучка



**Львів  
Каменяр  
2014**

УДК 539.3:624.012:691.15:621.643.001  
ББК 38.3  
М55

Збірник об'єднує дослідження, присвячені таким проблемам: аналітичні та числові методи в механіці і фізиці руйнування будівельних матеріалів та конструкцій; експериментальні методи дослідження і діагностика роботи будівельних матеріалів та конструкцій; прикладні питання механіки руйнування будівельних матеріалів, конструкцій та споруд; інженерні будівельні конструкції (нафто-, газопроводи, мости і споруди).

Сборник содержит исследования, посвящены следующим проблемам: аналитические и числовые методы в механике и физике разрушения строительных материалов и конструкций; экспериментальные методы исследования и диагностика работы строительных материалов и конструкций; прикладные вопросы механики разрушения строительных материалов, конструкций и сооружений; инженерные строительные коммуникации (нефте-, газопроводы, мосты и сооружения).

In this book the papers, which dedicated to following problems: analytical and numerical methods in fracture mechanics and physics of construction materials and structures; experimental methods and diagnostics of construction materials and structures performance; applied problems of fracture mechanics of construction materials and structures, special purpose structures; engineering construction communications (oil and gas pipelines, bridges and buildings, are given).

*Затверджено до друку вченою радою  
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України  
(протокол № 7 від 18 вересня 2014 р.)*

ISBN 978-966-607-311-9

© Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2014

## **Рецензенти:**

д. ф.-м. н., проф. Г. Т. СУЛИМ, д. т. н., проф. М. Г. ЧАУСОВ (розділ I)  
д. т. н., проф. В. П. СИЛОВАНЮК, д. т. н., проф. М. Г. МАР'ЄНКОВ (розділ II)  
д. т. н., проф. Є. В. ХАРЧЕНКО, д. т. н., проф. Є. М. БАБИЧ (розділ III)  
д. т. н., проф. В. Г. КВАША, д. т. н., проф. О. С. РАСПОПОВ (розділ IV)

## **Редакційна колегія:**

Відповідальний редактор д.т.н., проф. Й. Й. ЛУЧКО  
Заступник відповідального редактора д.ф.-м.н., проф. Г. Т. СУЛИМ  
Відповідальний секретар д.т.н., проф. І. М. ДОБРЯНСЬКИЙ

## **Члени редколегії:**

академіки НАН України О. М. ГУЗЬ, Л. М. ЛОБАНОВ, В. В. ПАНАСЮК; д. т. н. Є. М. БАБИЧ, д. т. н. С. Ю. БАБИЧ, д. т. н. А. М. БАМБУРА, д. т. н. В. А. БАЖЕНОВ, д. т. н. В. БУЧКОВСЬКИЙ (Польща), д. т. н., проф. Б. Г. ГНІДЕЦЬ, д. т. н. В. С. ДОРОФЕЄВ, д. т. н. В. Г. КВАША; д. т. н., чл.-кор. НАН України: В. І. КИР'ЯН, А. Я. КРАСОВСЬКИЙ, Е. І. КРИЖАНІВСЬКИЙ, д. т. н. П. ЛЕНКЕЙ (Угорщина), д. т. н. Ю. І. НЕМЧИНОВ, д. т. н. Г. М. НИКИФОРЧИН, д. т. н. О. П. ОСТАШ, д. т. н. О. М. ПШНЬКО, д. т. н. В. Д. ПЕТРЕНКО, д. т. н. К. О. ПІРАДОВ (Росія), д. т. н. В. Г. ПІСКУНОВ, д. т. н. О. С. РАСПОПОВ, д. т. н. М. В. САВИЦЬКИЙ, д. т. н. О. В. СЕМКО, д. т. н. Є. В. ХАРЧЕНКО, д. т. н. М. Г. ЧАУСОВ, д. ф.-м. н. В. Ф. ЧЕКУРІН, д. т. н. Л. ЧАРНЕЦЬКИЙ (Польща), д. т. н. В. Л. ЧЕРНЯВСЬКИЙ, д. т. н. Л. О. ШЕЙНІЧ, д. т. н. П. В. ЯСНІЙ.

*М. М. Семерак<sup>1</sup>, О. І. Балицький<sup>2</sup>, А. В. Субота<sup>1</sup>, Д. В. Харишин<sup>1</sup>*

### **Вогнестійкість будівельних конструкцій за умов пожежі**

В роботі досліджено нестационарне температурне поле по товщині масивної конструкції за умови зміни температури зовнішнього середовища за “стандартним температурним режимом пожежі”. Теплообмін між конструкцією і середовищем здійснювався за граничними умовами третього роду. Запропонована методика аналітичного дослідження температурного поля по товщині конструкції в залежності від часу.

**Ключові слова:** масивна конструкція, вогнестійкість, “стандартний температурний режим пожежі”, теплообмін, температурне поле.

*М. М. Семерак, А. И. Балицкий, А. В. Субота, Д. В. Харишин*

### **Огнестойкость строительных конструкций в условиях пожара**

В работе исследовано нестационарное температурное поле по толщине массивной конструкции в условиях изменения температуры окружающей среды за “стандартным температурным режимом пожара”. Теплообмен между конструкцией и средой осуществляется с учётом граничных условий третьего рода. Предложена методика аналитического исследования температурного поля по толщине конструкции в зависимости от времени.

**Ключевые слова:** массивная конструкция, огнестойкость, “стандартный температурный режим пожара”, теплообмен, температурное поле.

*Semerak M.M., Balitskii A.I., Subota A.V., Charyshyn D.V.*

### **Fire resistance of construction structures under the fire conditions**

The non-stationary temperature field is in-process investigational on the thickness of massive construction on condition of change of temperature of external environment after the "standard temperature condition of fire". A heat exchange between a construction and environment was carried out on the boundary terms of the third kind. The offered methods of analytical research of the temperature field are depending on time on the thickness of construction.

**Key words:** massive construction, fire resistance, "standard temperature condition of fire", heat exchange, temperature field.

---

<sup>1</sup> Львівський державний університет безпеки життєдіяльності.

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів.

**Проблема та її актуальність.** Щодня в країні виникають десятки, сотні пожеж, матеріальні втрати від яких в основному зумовлені руйнуванням конструкцій будівель і споруд. Будівельні конструкції житлових та громадських будівель в основному виготовляються з бетону, залізобетону та цегли. Основним руйнівним фактором, що діє на конструкцію за умов пожежі, є величина температури конструкції і її градієнт.

При оцінці вогнестійкості конструкцій за умов пожежі необхідно враховувати термонапружений стан конструкції, зумовлений зміною температури, величиною температурного градієнта і часом нагріву. Аналітичні дослідження дають можливість за короткий час провести розрахунки і аналіз температурного поля, температурних напружень і переміщень у конструкціях різних геометричних розмірів з врахуванням теплофізичних і механічних властивостей матеріалів (бетон, цегла, метал і ін.).

Інтенсивність прогрівання конструкцій і величина градієнта температури по її товщині залежать від багатьох факторів: величини температури полум'я, умов теплообміну між поверхнею конструкції і зовнішнім середовищем, теплофізичних характеристик матеріалів, з яких виготовлена конструкція, часу прогрівання, форми конструкції та ін.

**Мета роботи** – розробка методики аналітичного дослідження вогнестійкості будівельної конструкції в залежності від часу.

**Постановка задачі.** При пожежах у житлових, адміністративних та громадських будівлях температура в приміщенні сягає  $1100^{\circ}\text{C}$ . При такій температурі пожежі конструкції стін і перекриття інтенсивно нагріваються.

Дослідимо температурне поле конструкцій за умов пожежі, температура якої змінюється в часі за “стандартним температурним режимом пожежі” [1].

$$t^*(\tau) = 345 \cdot \lg(1 + 8 \cdot \tau) + t_0, \quad (1)$$

де  $t^*(\tau)$  – зміна температури середовища в часі,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau$  – тривалість пожежі, хв;  $t_0$  – початкова температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Температура середовища змінюється за законом (1). Теплообмін між середовищем та конструкцією здійснюється за законом Ньютона – Ріхмана.

Початок системи декартових координат розмістимо на поверхні конструкції. Напрямок осі абсцис направимо по товщині конструкції. Для знаходження закону зміни температурного поля по товщині конструкції з плином часу розв'язуємо диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності [2]:

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

де  $\tau$  – час, с;  $t_0$  – початкова температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a = \frac{\lambda}{c_v \cdot \rho}$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;  $c_v$  – теплоємність при сталому об'ємі,  $\text{Дж} / (\text{кг} \times \text{К})$ ;  $\rho$  – густина,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Вираз (2) є диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності другого порядку. Для знаходження його розв'язку необхідно задати одну початкову і дві граничні умови:

$$t(x, 0) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda} (t^*(\tau) - t(0, \tau)) = 0, \quad t(\infty, \tau) = 0, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну;  $\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{Bm}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

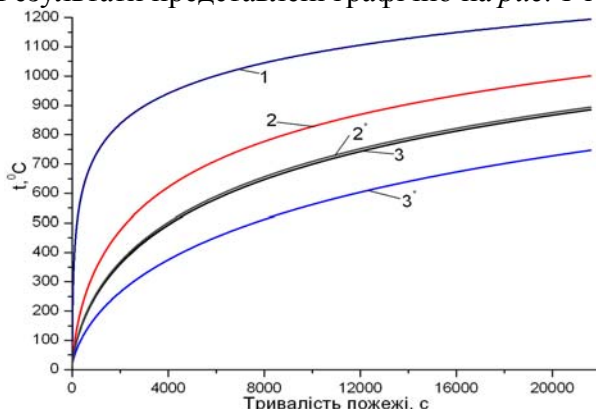
Застосувавши перетворення Лапласа до рівняння (2) та краєвих умов (3), (4) з врахуванням виразу (1), отримаємо розв'язок задачі у вигляді:

$$t(x, \tau) = 345 \cdot \int_0^{\tau} \left[ \begin{array}{l} \lg\left(1 + \frac{8}{60} \cdot (\tau - v)\right) \cdot \\ \left[ \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{a}{\pi \cdot v}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot v}\right) - a \cdot \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot \right. \\ \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{\lambda} \cdot x + a \cdot \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 \cdot v\right) \cdot \\ \left. \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot v}} + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot v}\right) \right] \right] \cdot dv, \quad (5)$$

де:  $\operatorname{erfc}(r) = 1 - \operatorname{erf}(r)$ ,  $\operatorname{erf}(r) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-y^2} dy$  – функція помилок

Гауса.

За формулою (5) проведено дослідження зміни температурного поля цегляної стінки залежно від координати  $x$  і тривалості пожежі  $\tau$ . Результати представлені графічно на *рис. 1* і *рис. 2*.



*Рис. 1.* Зміна температури на поверхні цегляної стінки (2,3), бетонної стінки (2\*,3\*) та в приміщенні в залежності від тривалості пожежі та коефіцієнту теплообміну:

1 – “стандартний температурний режим пожежі”

2, 2\* – температура поверхні конструкції при  $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

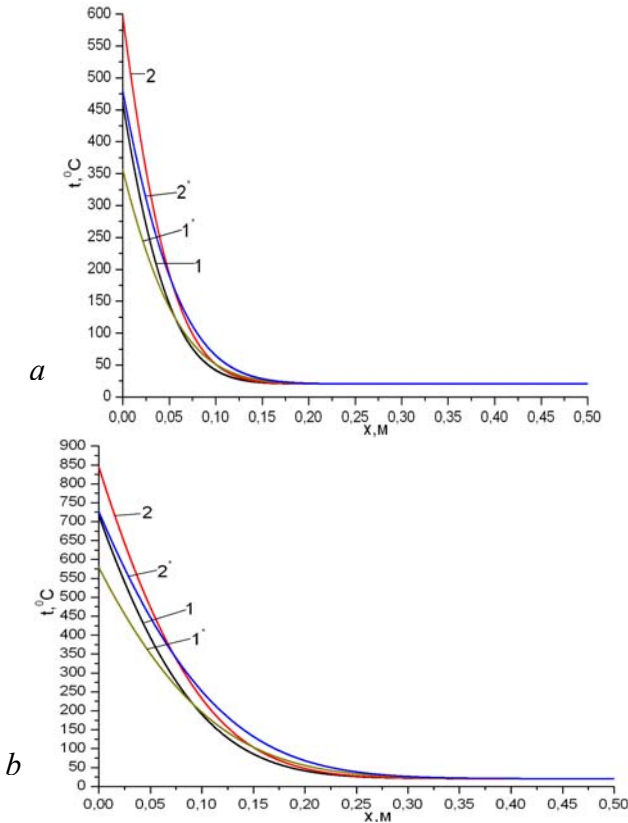
3, 3\* – температура поверхні конструкції при  $\alpha = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Аналіз *рис. 1* показує, що при різних інтенсивностях теплообміну  $\alpha$  між поверхнею конструкції і зовнішнім середовищем температура поверхні значно нижча від температури сере-

довища, яке нагріває конструкцію. Найбільш інтенсивно нагрівається поверхня в початковий момент часу (до 1 год). Інтенсивність її нагріву з часом зменшується.

За однакових умов теплообміну (рівності коефіцієнтів теплообміну) температура на поверхні бетонної стінки є меншою від цегляної, що пов'язано з більшим коефіцієнтом температуропровідності бетону, в результаті чого в глибину конструкції передається більша кількість тепла.

На *рис. 2* показано залежності зміни температурного поля по товщині цегляної (1, 2) та бетонної стінки (1\*, 2\*) у конкретний момент часу від початку пожежі.





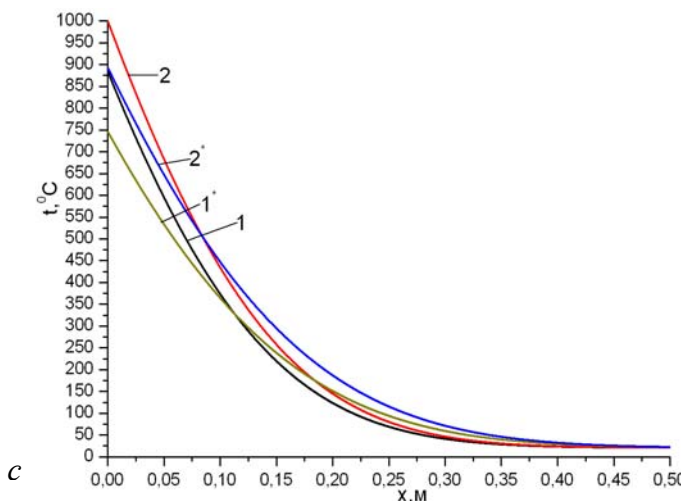


Рис. 2. Зміна температури по товщині цегляної та бетонної конструкції в залежності від тривалості пожежі ( $a - 1$  год,  $b - 3$  год,  $c - 6$  год) та коефіцієнту теплообміну:

1, 1\* -  $\alpha = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 2, 2\* -  $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Аналіз графічних залежностей (рис. 2) показує, що при більшому коефіцієнту теплопровідності матеріалу, з якого виготовлена конструкція, вона прогрівається на більшу глибину.

**Висновки.** 1. Аналіз одержаних результатів дослідження показує, що при різних інтенсивностях теплообміну  $\alpha$  між поверхнею конструкції і зовнішнім середовищем температура поверхні нижча на 200–400 °С від температури середовища, яке нагріває конструкцію (“стандартний температурний режим пожежі”).

2. Величина значень температурного поля та градієнту температури на поверхні конструкції залежить від коефіцієнту теплопровідності матеріалу, з якого виготовлена конструкція. Ці величини впливають на значення температурних переміщень та напружень.

3. З метою зменшення величини температурних напружень та деформацій необхідно поверхню конструкції покрити теплоізоляційними матеріалами.

**Summary.** 1. The analysis of obtained results of investigation has shown that at different intensities of heat exchange  $\alpha$  between the surface of construction and external environment the temperature

of surface is below on 200–400<sup>0</sup>C from the temperature of environment which heats a construction ("standard temperature condition of fire").

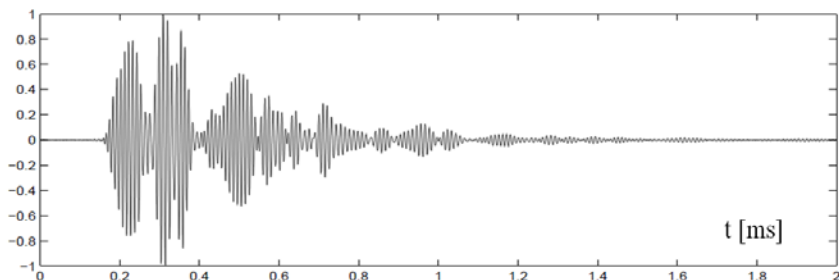
2. Size of values of the temperature field and on the surface of construction depends on the gradient of temperature to the coefficient of heat-conducting of material from which the construction made. These sizes influence on the value of the temperature moving and tensions.

3. With the purpose of decreasing of size of temperature tensions and deformations it is necessary to cover the surface of construction by heat-insulation materials.

1. *ДСТУ Б В 1.1-4-98*. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги. К.: Держбуд України, 1999. – 21с.

2. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа 1967. – 600 с.

Znormalizowana amplituda



Rys. 2. Przykład sygnału zarejestrowanego przez przetworniki PZT dla nieuszkodzonej struktury

Do wnioskowania o stanie monitorowanej struktury wykorzystuje się zwykle pewne charakterystyki sygnału, tzw. wskaźniki uszkodzeń (*damage indices*), przez porównanie do sygnału odniesienia, tzw. *baseline*, zarejestrowanego dla wyjściowego stanu struktury. Oznaczając przez  $f_{gs}$  sygnał wygenerowany przez generator  $g$  i zarejestrowany przez sensor  $s$  dla danego stanu struktury,  $f_{gs}^{env}$  jego obwiednię, przez  $f_{gs,b}$ ,  $f_{gs,b}^{env}$  odpowiadający sygnał odniesienia (*baseline*) wraz z obwiednią, oraz przez  $cor(f_{gs}^{env}, f_{gs,b}^{env})$  próbkową korelację obwiedni, przykładowe wskaźniki uszkodzeń dane są następująco:

$$\begin{aligned}
 DI_1(g, s) &= 1 - cor(f_{gs}^{env}, f_{gs,b}^{env}), \\
 DI_2(g, s) &= \left| \frac{\int (f_{gs}^{env} - f_{gs,b}^{env})^2 dt}{\int (f_{gs,b}^{env})^2 dt} \right| \quad (1)
 \end{aligned}$$

Powyższe wskaźniki uszkodzeń są wrażliwe na zmiany energii rejestrowanego sygnału związane z rozproszeniem fali elastycznej na pęknięciu. Wskaźniki te wykorzystują jedynie informację o amplitudzie sygnału, pomijając jego fazę. Ma to na celu zmniejszyć ich podatność na niekontrolowane parametry pomiaru, np. zmienne warunki środowiskowe. Wprowadzone charakterystyki sygnału zależą od lokalizacji uszkodzenia względem danej ścieżki pomiarowej  $g \rightarrow s$  wyznaczonej przez generator  $g$  i sensor  $s$ , zatem

<b>Слободянюк С. А., Лучко Й. Й., Буратинский А. П.</b> Применение МКЭ для решения задач ползучести и виброползучести с помощью математического пакета MathCad.....	113
<b>Сулим Г. Т., Онишкевич В. М.</b> Втискування нагрітого циліндричного штампа з плоскою основою в пружний півпростір .....	124
<b>Марта Сибіс.</b> Вплив функції форми на точність розрахунку в методі скінченних елементів .....	136
<b>Кшиштоф Горскі, Даніель Завал, Саймон Долата.</b> Спосіб оцінки впливу сукупних і перероблених волокон целюлози на властивості бетонної суміші і міцнісних параметрів самотверднющого бетону (RASCC).....	148
 <b>РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ І ДІАГНОСТИКА РОБОТИ БУДІВЕЛЬНИХ І КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, ВИРОБІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ.....</b>	
<b>Добрянський І. М., Добрянська Л. О., Іваник Є. Г., Сікора О. В.</b> Дослідження впливу залишкових напружень на докритичний ріст тріщин в пластині в умовах високотемпературної повзучості.....	170
<b>Демчина Б.Г., Черевко М.В.</b> Дослідження скляних балочних конструкцій з використання методу цифрової кореляції зображення .....	176
<b>Семерак М. М., Балицький О. І., Субота А. В., Харишин Д. В.</b> Вогнестійкість будівельних конструкцій за умов пожежі.....	183
<b>Гаврилюк М. Р.</b> Деякі аспекти впливу змащувально-охолоджуючих рідин на обробку металів різанням.....	190
<b>Гребенюк С. О.</b> Розробка технології азотування і його вплив на механічні властивості литого армко-заліз.....	199
<b>Рудаков В. Н., Абракітов Д. В., Мельнік А. Ю.</b> Про ефект реалізації фізичних властивостей наноструктурних матеріалів при проектуванні несучих елементів універсального призначення.....	204