

УДК 614.841.45

**ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ В УМОВАХ ВОГНЕВОГО ВПЛИВУ РОЗРАХУНКОВИМИ МЕТОДАМИ***С.В. Новак<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., П.Г. Круковський<sup>2</sup>, д-р. техн. наук, проф., М.С. Перепелиця<sup>2</sup>*<sup>1</sup>Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України**ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ**Надійшла до редакції: 23.05.2016  
Пройшла рецензування: 22.07.2016**Ключові слова:**

вогнестійкість, коефіцієнт перерізу, критична температура, розподіл температури, розрахункові методи, сталеві конструкції, теплофізичні властивості.

Відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [1] одним із етапів процедури оцінювання вогнестійкості будівельних несучих сталевих конструкцій (далі – сталевих конструкцій) є розрахунок розподілу температури у сталевій конструкції в умовах вогневого впливу. У зазначеному стандарті наведено методи розрахунку як для рівномірного так і для нерівномірного розподілів температури по перерізу сталеві конструкції. При цьому для рівномірного розподілу вважають, що для часу  $t$  вогневого впливу температура в усіх точках перерізу сталеві конструкції однакова, а для нерівномірного розподілу – змінна по перерізу. Положення зазначеного стандарту дозволяють виконувати оцінку вогнестійкості сталеві конструкції, застосовуючи розрахункові температури, отримані для різних розподілів температури. Однак у цих положеннях не наведено даних стосовно відмінностей у результатах оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій, які отримані для рівномірного і нерівномірного розподілів температури по їх перерізу, а також не визначено, застосування якого з цих розподілів призводить до отримання результатів з більшою вогнестійкістю, що важливо знати для практичної реалізації процедури оцінювання вогнестійкості, наведеної у зазначеному стандарті.

З урахуванням вищезазначеного, метою даної роботи було визначення рівномірного і нерівномірного розподілів температури по перерізу сталеві конструкції в умовах вогневого впливу розрахунковими методами та

**АНОТАЦІЯ**

Наведено постановку задачі та результати визначення розрахунковими методами рівномірних та нерівномірних розподілів температури по перерізу сталеві балки, на яку опирається бетонна плита перекриття завтовшки 120 мм, для вогневого впливу за стандартним температурним режимом для незахищеної сталеві балки та сталеві балки, на поверхню якої нанесено вогнезахисний матеріал завтовшки 10 мм, 15 мм, 20 мм. Встановлено, що при застосуванні нерівномірного розподілу температури по перерізу сталеві балки розрахункова вогнестійкість незахищеної і захищеної сталеві балки (двотавр №35Б1 за ГОСТ 26020) є більшою, ніж при застосуванні рівномірного розподілу температури.

встановлення розподілу температури, для якого розрахункова вогнестійкість цієї конструкції є більшою.

**Постановка теплотехнічної задачі** визначення розподілів температури по перерізу сталеві конструкції в умовах вогневого впливу розрахунковими методами є такою.

Для сталеві балки (двотавр №35Б1 за ГОСТ 26020 [2]), на яку опирається бетонна плита перекриття завтовшки 120 мм (див. рисунок 1), необхідно визначити рівномірний та нерівномірний розподіли температури в її поперечному перерізі для часу  $t_{fi,requ} = 60$  хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом для таких варіантів:

- незахищена сталеві балка;
- захищена сталеві балка, на поверхню якої нанесено вогнезахисний матеріал (далі – покриття) завтовшки 10 мм;
- захищена сталеві балка з покриттям завтовшки 15 мм;
- захищена сталеві балка з покриттям завтовшки 20 мм.

Залежності теплопровідності  $\lambda_p$  та питомої об'ємної теплоємності  $c_p$   $\rho_p$  покриття від температури наведено на рисунку 2. Ці теплофізичні властивості покриття визначено за методом, який наведено в додатку Л ДСТУ Б В.1.1-17 [3] (методом розв'язання оберненої задачі теплопровідності).

\* E-mail: novak.s.fire@gmail.com (S. Novak)

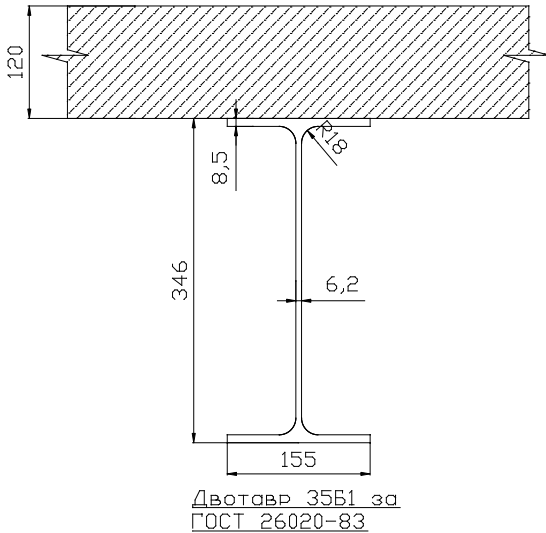


Рисунок 1 – Схема конструкції, що складається зі сталеві балки, на яку опирається бетонна плита перекриття

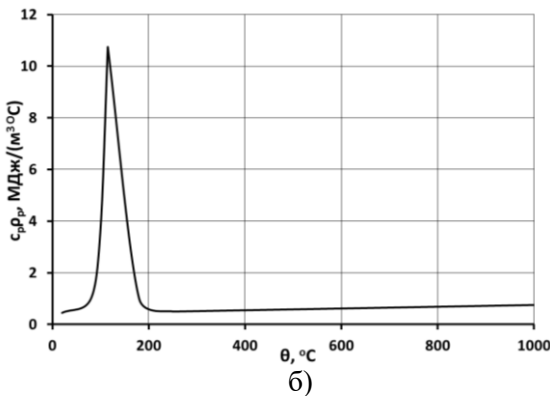
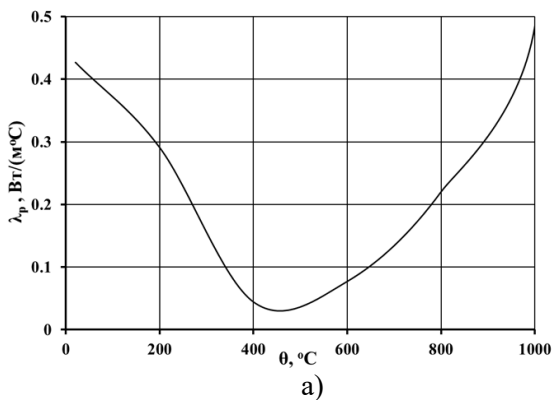


Рисунок 2 – Залежності теплопровідності (а) та питомої об’ємної теплоємності (б) покриття від температури

### Математичні моделі

Відповідно до стандарту [1] при розрахунку рівномірного розподілу температури по перерізу сталеві конструкції теплообмін між цією конструкцією та іншими будівельними конструкціями, наприклад, з плитою перекриття, не враховують і вважають, що для

часу  $t$  вогневого впливу температура в усіх точках перерізу сталеві конструкції однакова. При цьому сталеві конструкцію розглядають, як окрему конструкцію, що має коефіцієнт перерізу  $A_m / V$  – для незахищеної сталеві конструкції або  $A_p / V$  – для захищеної сталеві конструкції, де  $A_m$  та  $A_p$  – площа поверхні, яка піддається вогневному впливу, для незахищеної та захищеної конструкції, відповідно;  $V$  – об’єм незахищеної сталеві конструкції. При розрахунку нерівномірного розподілу температури по перерізу сталеві конструкції теплообмін між цією конструкцією та іншими будівельними конструкціями враховують.

З урахуванням вищезазначеного та положень, наведених в стандартах [1] та [4], для розрахунків температури захищеної сталеві балки для рівномірного розподілу температури в її поперечному перерізі застосовували таку систему рівнянь [3]:

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < d_p; \theta_p = \theta_p(x, t); 0 < t \leq t_{fi, requ},$$

$$\text{– початкова умова: } \theta_p(x, 0) = \theta_0, \quad (2)$$

– гранична умова на обігрівній поверхні покриття, при  $x = d_p$ :

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \alpha^* (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (3)$$

$$\alpha^* = \alpha_c + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] / (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (4)$$

– гранична умова на внутрішній поверхні покриття, при  $x = 0$ :

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = c_a \rho_a \frac{V}{A_p} \frac{\partial \theta_p}{\partial t}; \quad (5)$$

$$\theta_a(t) = \theta_p(0, t), \quad (6)$$

де  $x$  – координата в покритті ( $x = 0$  відповідає місцю контакту покриття зі сталеві поверхнею), м;

$t$  – час, с;

$t_{fi, requ}$  – час, який відповідає нормованій межі вогнестійкості,  $t_{fi, requ} = 60$  хв;

$\alpha_c$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні покриття,  $\alpha_c = 25$  Вт/(м·К);

$\alpha^*$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на обігрівній поверхні покриття, Вт/(м·К);

$\Phi$  – кутовий коефіцієнт,  $\Phi = 1,0$ ;

$\varepsilon_m$  – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття,  $\varepsilon_m = 0,8$ ;

$\varepsilon_f$  – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я,  $\varepsilon_f = 1,0$ ;

$\sigma$  – стала Стефана Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>);

$\theta_a$  – температура сталі, °С;

$\theta_{g,t}$  – температура газового середовища в момент часу  $t$ , яка змінюється за стандартним температурним режимом [1], °С;

$\theta_m$  – температура обігрівної поверхні покриття, °С;

$\theta_0$  – початкова температура,  $\theta_0 = 20$  °С;

$\theta_p$  – температура покриття, °С;

$\lambda_p$  – теплопровідність покриття, Вт/(м·К);

$c_a$  – питома теплоємність сталі відповідно до 6.5.3.1.2, Дж/(кг·К);

$c_p$  – питома теплоємність покриття, Дж/(кг·К);

$\rho_p$  – густина покриття, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_a$  – густина сталі,  $\rho_a = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;

$A_p / V$  – коефіцієнт перерізу захищеної сталеві балки, м<sup>-1</sup>.

Для розрахунків температури незахищеної сталеві балки для рівномірного розподілу температури в її поперечному перерізі застосовували рівняння, наведені в [1], зокрема таке рівняння, за яким визначають підвищення температури сталеві балки:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V \cdot \dot{h}_{net}}{c_a \rho_a} \Delta t \quad (7)$$

де  $\Delta\theta_{a,t}$  – підвищення температури сталеві балки за проміжок часу  $\Delta t$ , °С;

$k_{sh}$  – коригувальний коефіцієнт ефекту затінення;

$A_m / V$  – коефіцієнт перерізу незахищеної сталеві балки, м<sup>-1</sup>;

$\dot{h}_{net}$  – розрахункове значення результуючого теплового потоку на обігрівній поверхні сталеві балки, Вт/м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  – проміжок часу, с.

Для розрахунків нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі сталеві балки застосовували математичну модель нестационарної теплопровідності, яка враховує радіаційно-конвективний теплообмін від газового середовища до обігрівних поверхней балки та плити перекриття, кондуктивний

теплообмін у цих конструкціях та радіаційно-конвективний теплообмін від плити перекриття в навколишнє середовище з боку її поверхні, що не обігривається. Зазначена модель містить рівняння, аналогічні (1) – (4), які наведені для сталеві балки та плити перекриття для двохмірної постановки теплотехнічної задачі, а також рівняння ідеального теплового контакту між сталеві балкою та плитою перекриття.

При розрахунках теплофізичні властивості матеріалів задавались у вигляді залежностей від температури, наведених в 3.4 ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2 [1] (для сталі) та 3.3 ДСТУ-Н EN 1992-1-2 [5] (для бетону). При цьому для бетону приймали вологість 3 %, густину 2300 кг/м<sup>3</sup> за температури 20 °С, змінення теплопровідності за верхньою граничною кривою.

### Результати розрахунків та їх аналіз

Розрахунки температури сталеві балки при її рівномірному розподілі були виконані із застосуванням комп'ютерної програми FRIEND [6], у якій впроваджено чисельний метод розв'язання за неявною кінцево-різницевою схемою апроксимації. На рисунку 3 наведено отримані розрахункові залежності температури сталеві балки від часу вогневого впливу для незахищеної сталеві балки та захищеної сталеві балки з покриттям завтовшки 10 мм, 15 мм та 20 мм.

Із аналізу цих залежностей випливає, що величина товщини покриття значно впливає на інтенсивність нагрівання сталеві балки і на значення розрахункові температури для часу 60 хв вогневого впливу, яке становить для незахищеної сталеві балки 937 °С, для захищеної сталеві балки: 703 °С – при товщині покриття 10 мм, 520 °С – при товщині покриття 15 мм, 366 °С – при товщині покриття 20 мм. На рисунку 4 надано залежність температури сталеві балки від товщини покриття для часу 60 хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом. За цією залежністю визначають мінімальну товщину покриття, за якої розрахункове значення температури сталеві балки не перевищує розрахункового значення критичної температури сталі, що при застосуванні спрощеного методу [1] є умовою вогнестійкості сталеві конструкції.

Розрахунки нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі сталеві балки виконані із застосуванням комп'ютерної програми ANSYS FLUENT [7]. Розрахункова сітка моделі мала 40 тисяч розрахункових елементів.

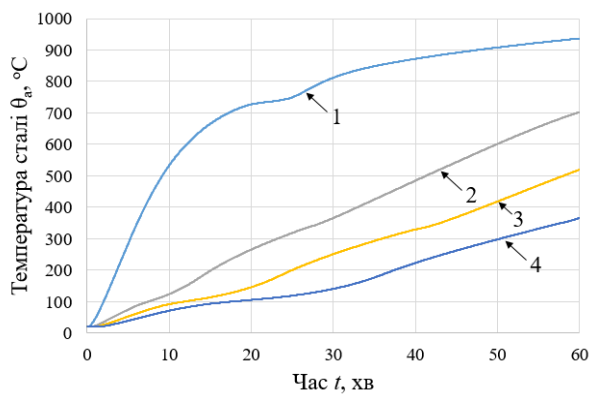


Рисунок 3 – Залежності температури сталеві балки від часу вогневого впливу: 1 – для незахищеної сталеві балки; 2, 3, 4 – для захищеної сталеві балки з покриттям завтовшки 10 мм, 15 мм та 20 мм

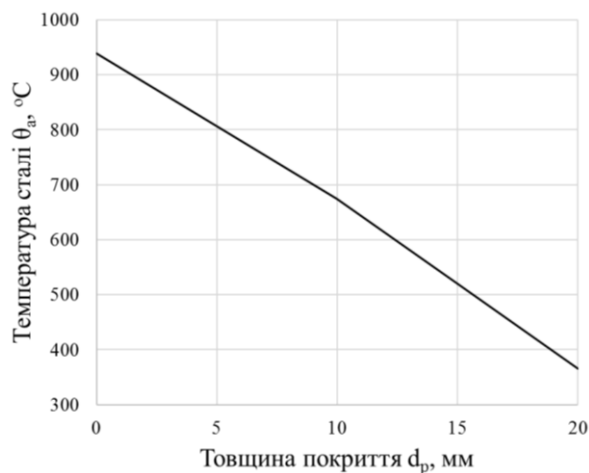


Рисунок 4 – Залежність температури сталеві балки від товщини покриття для часу 60 хв вогневого впливу

Розрахункові розподіли температури в поперечному перерізі сталеві балки та бетонній плити перекриття для часу 60 хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом для варіантів із незахищеною та захищеною сталеві балкою наведено на рисунку 5. На рисунку 6 для цих же варіантів і моменту часу показано змінення температури сталі по висоті балки та бетону по товщині плити перекриття. На цьому рисунку  $x$  – це відстань по осі сталеві балки від її нижньої полки. Із аналізу рисунків 5 та 6 випливає, що для часу 60 хв вогневого впливу на рівень температури сталеві балки суттєво впливає величина товщини покриття, а температура сталеві балки змінюється по її висоті для всіх варіантів із незахищеною та захищеною балкою

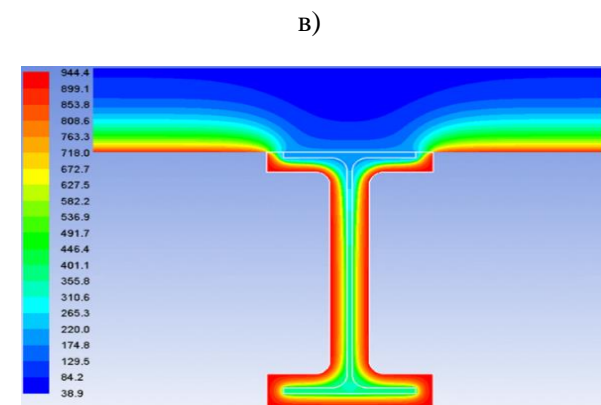
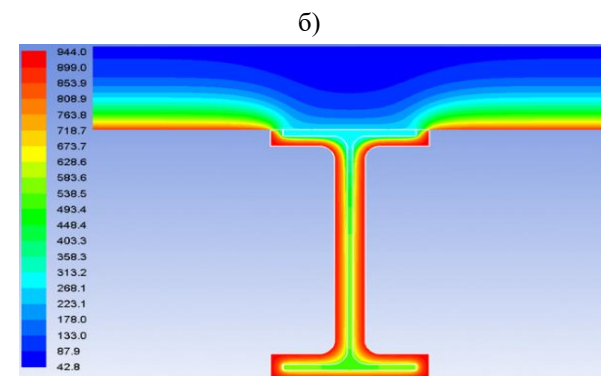
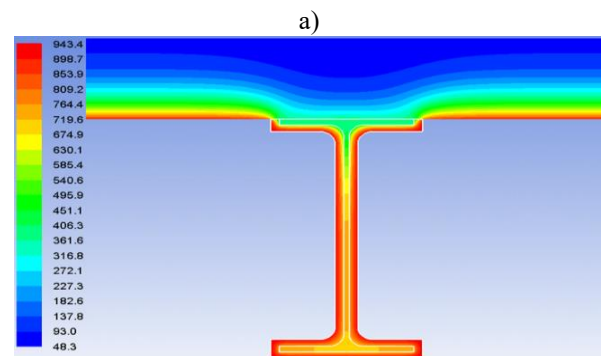
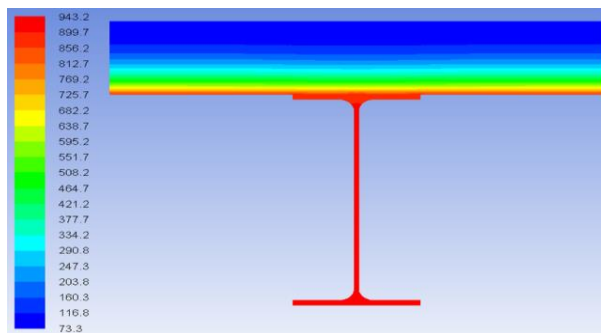


Рисунок 5 – Розподіли температури в поперечному перерізі плити перекриття та незахищеної сталеві балки (а), захищеної сталеві балки з покриттям завтовшки 10 мм (б), 15 мм (в), 20 мм (г) для часу 60 хв вогневого впливу

При цьому найменше змінення температури має місце для варіанта із незахищеною сталевією балкою, для якого температура балки однакова на відстані від 0 до 0,26 м і несуттєво зменшується (на 50 °С) на відстані від 0,3 м до 0,346 м (координата контакту сталевієї балки та бетонної плити перекриття). Для варіантів із захищеною сталевією балкою температура балки на відстані від 0 до 0,12 м підвищується на 23 - 40 °С, а на відстані від 0,12 до 0,346 м зменшується на 348 °С, 293 °С, 185 °С відповідно при товщині покриття 10 мм, 15 мм та 20 мм. Таке зменшення температури викликане значним тепловідводом від сталевієї балки до бетонної плити перекриття шляхом кондуктивного теплообміну. Про це свідчить хід ізотерм, наведених на рисунку 5, в зоні контакту балки з плитою перекриття.

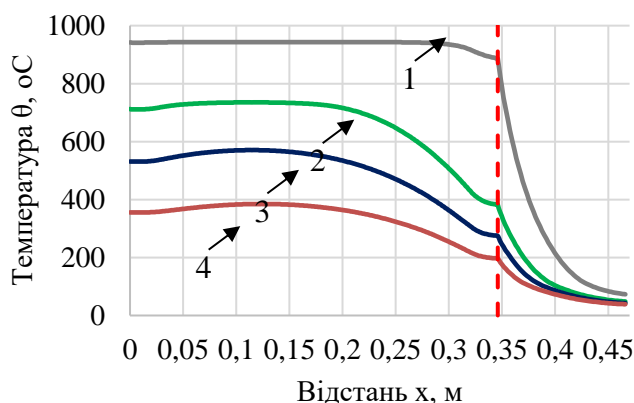


Рисунок 6 – Змінення температури сталі по висоті балки та бетону по товщині плити перекриття для часу 60 хв вогневого впливу: 1 – для незахищеної сталевієї балки; 2, 3, 4 – для захищеної сталевієї балки з покриттям завтовшки 10 мм, 15 мм та 20 мм

Із порівняння розрахункових температур в поперечному перерізі сталевієї балки, отриманих для варіантів рівномірного та нерівномірного розподілів (див. рисунок 7), впливає те, що значення температури балки при нерівномірному розподілі здебільшого менші, ніж при рівномірному розподілі. Найбільша різниця спостерігається, якщо у порівнянні брати значення температури в місці контакту балки та плити перекриття, і становить 316 °С, 242 °С, 166 °С відповідно при товщині покриття 10 мм, 15 мм та 20 мм. Більші значення температури при нерівномірному розподілі відносно температури при рівномірному розподілі (різниця на перевищує 51 °С) мають місце для захищеної сталевієї балки з товщиною покриття 10 мм та 15 мм на відстані (по її висоті)

від 0 до 0,21 м, а для балки з товщиною покриття 20 мм – на відстані від 0,04 м до 0,20 м.

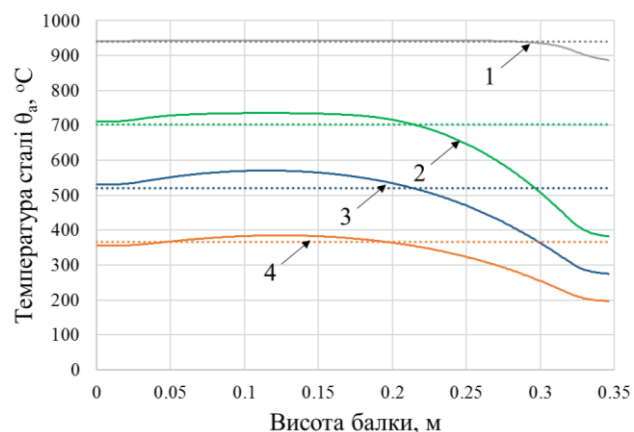


Рисунок 7 – Змінення температури сталі по висоті балки для часу 60 хв вогневого впливу для рівномірного (пунктирні лінії) і нерівномірного (суцільні лінії) розподілів температури для таких варіантів: 1 – незахищена сталева балка; 2, 3, 4 – захищена сталева балка з покриттям завтовшки 10 мм, 15 мм та 20 мм

З урахуванням вищезазначеного і положень стандарту [1] стосовно спрощених методів розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій впливає, що розрахункова вогнестійкість незахищеної і захищеної сталевієї балки при застосуванні нерівномірного розподілу температури по перерізу сталевієї конструкції в умовах вогневого впливу є більшою ніж при застосуванні рівномірного розподілу через те, що значення температури балки при нерівномірному розподілі здебільшого менші, ніж при рівномірному розподілі.

### Висновки

Визначено розрахунковими методами та проаналізовано рівномірні та нерівномірні розподіли температури по перерізу сталевієї балки (двотавр №35Б1 за ГОСТ 26020), на яку опирається бетонна плита перекриття завтовшки 120 мм, для часу 60 хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом для незахищеної балки та балки, на поверхню якої нанесено покриття завтовшки 10 мм, 15 мм, 20 мм. Встановлено, що для усіх варіантів значення температури балки при нерівномірному розподілі здебільшого менші (максимальна різниця складає 316 °С), ніж при рівномірному розподілі. Найбільше перевищення температури балки при

нерівномірному розподілі над температурою при рівномірному розподілі становить 51 °С.

Встановлено, що при застосуванні нерівномірного розподілу температури по перерізу сталеві балки розрахункова вогнестійкість незахищеної і захищеної сталеві балки (двотавр №35Б1 за ГОСТ 26020) є більшою, ніж при застосуванні рівномірного розподілу температури.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1991-1-2:2005, IDT).
2. ГОСТ 26020-83 Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент (Двотаври сталеві гарячекатані з паралельними гранями полиць. Сортамент).
3. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (EN 13381-4:2002, NEQ).
4. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).
5. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT).
6. 10. Круковский П.Г. Обратные задачи тепло-массопереноса (общий инженерный подход). Киев, Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998, 224 с.
7. C.T. Crowe, J.D. Swarzkopf, M. Sommerfeld, Y. Tsuji. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press; 1 edition (November 13, 1997).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ В УСЛОВИЯХ ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

*С.В. Новак<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., П.Г. Круковский<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., М.С. Перепелица<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Український науково-дослідницький інститут громадянської захисту, Україна*

<sup>2</sup>*Інститут технічної теплофізики НАН України*

---

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

огнестойкость, коэффициент сечения, критическая температура, распределение температуры, расчетные методы, стальная конструкция, теплофизические свойства.

### АННОТАЦИЯ

Приведена постановка задачи и результаты определения расчетными методами равномерных и неравномерных распределений температуры по сечению стальной балки, на которую опирается бетонная плита перекрытия толщиной 120 мм, для огневого воздействия по стандартному температурному режиму для незащищенной стальной балки и стальной балки, на поверхность которой нанесен огнезащитный материал толщиной 10 мм, 15 мм, 20 мм. Установлено, что при применении неравномерного распределения температуры по сечению стальной балки расчетная огнестойкость незащищенной и защищенной стальной балки (двотавр №35Б1 по ГОСТ 26020) является большей, чем при применении равномерного распределения температуры

## DETERMINATION OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN STEEL CONSTRUCTION IN TERMS OF FIRE EXPOSURE CALCULATION METHODS

*S. Novak<sup>1</sup>, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. St. Sc., P. Krukovsky<sup>2</sup>, Doc. of Sc. (Eng.), Prof., M. Perepelytsia<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine*

<sup>2</sup>*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

---

### KEYWORDS

fire resistance, factor section, critical temperature, temperature distribution, calculation methods, steel construction, thermal properties.

### ANNOTATION

A statement of the problem and the results of calculation of uniform and non-uniform temperature distributions on the cut steel beams, which resists concrete slab floor thickness of 120 mm, for fire exposure on a standard temperature conditions for unprotected steel beams and steel beams, the surface of which bear the fireproof material thickness of 10 mm, 15 mm, 20 mm. It is established that the application of non-uniform temperature distribution in cross section steel beam fire resistance design protected and unprotected steel beams is greater than with uniform temperature distribution.