

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕБЕТОННИХ БАЛОК НА ОСНОВІ УРАХУВАННЯ ЗМІНИ ДЕФОРМАТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Добрянський І.М., Добрянська Л.О.,
Львівський національний аграрний університет

Іваник Є.Г.
Академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
м. Львів, Україна

АНОТАЦІЯ: Виконано експериментально-теоретичні дослідження сталобетонних балкових конструкцій декількох серій при дії вогню, що передбачається умовами стандартної пожежі. Розвинута математична модель заснована на методі послідовних наближень. Для розрахунку межі вогнестійкості сталобетонних конструкцій використано залежності фізико-механічних параметрів від температури на основі даних експерименту та співставлення з довідниковими значеннями.

АННОТАЦИЯ: Выполнены экспериментально-теоретические исследования сталобетонных балочных конструкций нескольких серий при воздействии огня, предусмотренного условиями стандартного пожара. Развитая математическая модель основана на методе последовательных приближений. Для расчета границы огнестойкости сталобетонных конструкций используются зависимости физико-механических параметров от температуры на основе данных эксперимента и сопоставления со справочными значениями.

ABSTRACT: The experiment-theoretical investigation of the steel-concrete beam constructions of several series by action of fire which take into account purpose standard fire conditions is made. The evolution mathematical model basic on the method successive approximations is developed. To calculate the fire resistance of steel concrete structures depending on the physical and mechanical parameters of temperature on the basis of experimental data and comparing with default values are used.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Сталобетонні балки, деформація, напруження, вогнестійкість, температурне поле, математична модель.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Аналітична оцінка вогнестійкості сталобетонних балок складається з теплотехнічної і статичної частин; теплотехнічна частина полягає в розрахунку температурного поля та встановлення величини температури в довільній точці перерізу конструкції у визначені моменти часу в умовах дії пожежі стандартного режиму, а статична частина характеризує визначення ознак втрати несучої здатності в результаті зміни фізико-механічних властивостей і розвитку додаткових температурних змін.

При високоінтенсивних теплових впливах в конструкційних матеріалах відбуваються складні фізико-хімічні зміни, а температурне поле обумовлюється комплексом складних процесів тепломасообміну [1–6]. Внаслідок фазових перетворень в бетонній складовій виникає надлишковий тиск і міграція вологи, випаровування в порах бетону вільної водяної маси викликає неперервне поглинання тепла, яке сповільнює прогрівання бетону [7]. Винесення розтягнутої полосової арматури на зовнішню прогріту грань балки також вносить свої корективи в теплотехнічний розрахунок. Розрахунки такого роду слід виконувати з урахуванням змінного положення лінії розділу сухого і вологого шарів бетону за умови постійного виділення і поглинання скритої теплоти пароутворення і конденсації, тобто постають нелінійні задачі типу Стефана, метою яких є відшукання залежностей для розподілу температури в фазах (твердій і рідкій) і швидкості переміщення межі розділу фаз (плавлення або випаровування) [1, 8, 9]. Тому постає проблема розвитку і застосування комбінованого, експериментально-теоретичного, методу визначення температурного поля.

Межа вогнестійкості сталобетонних балок визначається часом від початку пожежі до моменту, коли вичерпується несуча здатність, яка характеризується величиною руйнуючого навантаження в умовах пожежі. В розрахунку межі вогнестійкості важливим моментом є вибір допустимого навантаження на конструкції або систему в умовах пожежі. Тому в окремих випадках, коли є змога проаналізувати умови перебігу техногенного впливу, допустимо встановлювати реальне експлуатаційне навантаження в межах, менших за нормативні характеристики.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ, З ЯКИХ ЗАПОЧАТКОВАНО ВИРІШЕННЯ ДАНОЇ ПРОБЛЕМИ

В умовах пожежі фіксуються значні збитки для житлових, суспільних і промислових будівель. Значна частина їх припадає на вартість будівельних конструкцій, у тому числі залізобетонних, зруйнованих під час пожежі. Необхідність виконання значних досліджень в напрямі вогнестійкості будівельних систем викликана неперервним удосконаленням інженерної практики: поява нових конструкційних матеріалів, нових прогресивних конструкційних вирішень окремих складових і споруд в цілому. В більшості країн існує приблизно однаковий підхід до методик експериментальної оцінки межі вогнестійкості будівельних конструкцій, що дає можливість порівнювати і корелювати результати випробувань [10–12]. Дослідженням міцності і деформативності цементного каменя та звичайного тяжкого бетону в умовах дії підвищених та високих температур приділено уваги в значній кількості публікацій, виконаних вітчизняними і зарубіжними вченими [10–19]. Отримані при цьому дані з міцності і деформативності тяжкого бетону в умовах нагрівання кількісно значно відрізняються (відхилення може скласти до 50%), що пов'язано з різними складами досліджуваних бетонів, видами крупних заповнювачів, умовами затвердіння бетонів і методиками випробувань.

Як в нашій країні, так і за кордоном, приймаються значні зусилля з розширення досліджень конструкційних матеріалів та будівельних систем в умовах пожежі, удосконаленню протипожежних норм будівельного проектування.

Мета статті - загальне вирішення проблеми пожежної безпеки будівель і споруд в значній мірі засновано на узагальненні результатів вогневих випробувань інженерних систем і створенні та уніфікації на цій основі достатньо простих і надійних методик випробувань, що дають змогу достовірно оцінювати поведінку конструкцій в умовах пожежі.

Тому питання визначення вогнестійкості конструкції, а особливо сталобетонних з зовнішнім армуванням, є актуальними і потребують більш глибокого аналізу і додаткового дослідження.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Температурний вплив, викликаний дією вогню в умовах пожежі, швидко зумовлює прогрівання бетону і полосової арматури в перерізах сталобетонної балки. В цих умовах утворюється фронт випаровування, формується зона зі значними температурними градієнтами, тиску, вологості, виникають температурні і залишкові напруження. Утворені температурні деформації інженерної системи визначаються деформаціями бетонної та арматурної складових. При цьому наявність полосової арматури та швидкість її прогрівання суттєво впливає на виникаючий в системі напружено-деформований стан. Поява температурних деформацій викликає зміну кривизни балкової системи.

Розрахункова схема розбивання поперечного перерізу сталобетонного елемента показано на рис. 1, де відображено h і b – висота і ширина перерізу.

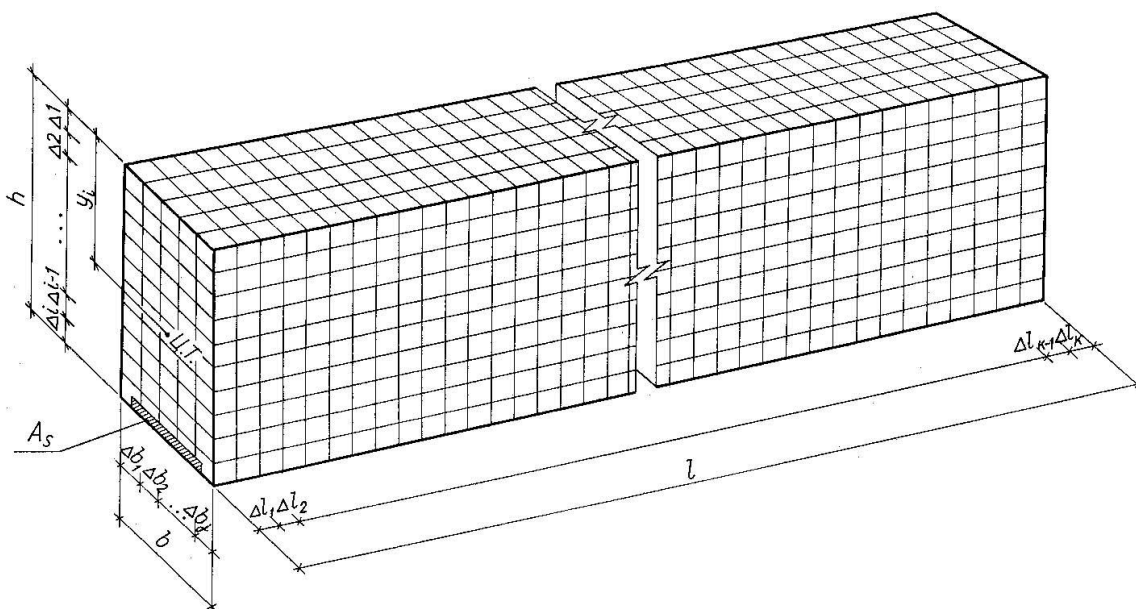


Рис. 1. Розрахункова схема розбивання сталобетонної балкової системи

Для ділянок сталобетонної балки з зовнішнім армуванням, в розтягнутій зоні якої не утворюються тріщини, нормальні до поздовжньої осі, переріз приводиться до більш міцнішого бетону, а видовження і кривизна від нагрівання визначаються залежностями:

$$\varepsilon_t = \frac{\alpha_{stm} t_s y_s - \alpha_{bt} t_b (h_0 - y_s)}{h}; \quad (1)$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_t = \frac{\alpha_{stm} t_s - \alpha_{bt} t_b}{h}, \quad \alpha_{stm} = \alpha_{bt} + (\alpha_{st} - \alpha_{bt}) \varphi_\alpha. \quad (2)$$

В співвідношеннях (1), (2) позначено:

α_{bt} і α_{st} – коефіцієнти лінійного температурного розширення бетону і арматури відповідно;

α_{stm} – коефіцієнт лінійного температурного розширення розтягнутої арматури в бетоні з урахуванням впливу роботи бетону між тріщинами;

$\left(\frac{1}{r}\right)_t$ – температурна кривизна осі елемента;

t_s і t_b – температура арматури і бетону відповідно.

Експериментально показано [10–12], що в умовах дії вогню до появи тріщин вздовж прогону конструкції величина температурних деформацій близька до деформацій бетону. Після тріщиноутворення температурні деформації згинних конструкцій балкового типу перевищують деформації бетону, але внаслідок адгезії та сил зчеплення, менші за деформації арматури.

Для коефіцієнта φ_α емпірично встановлено значення $\varphi_\alpha = 0,95$. Замість залежності (2) можна використати співвідношення для визначення кривизни від дії температури за допомогою значень середньої деформації розтягнутої полосової арматури ε_{st} і стиснутого бетону ε_{bt} :

$$\left(\frac{1}{r}\right)_t = \frac{\varepsilon_{st} + \varepsilon_{bt}}{h_0} \quad (3)$$

Розрахункова схема виокремлення поперечного перерізу сталобетонного елемента відображена на рис. 2.

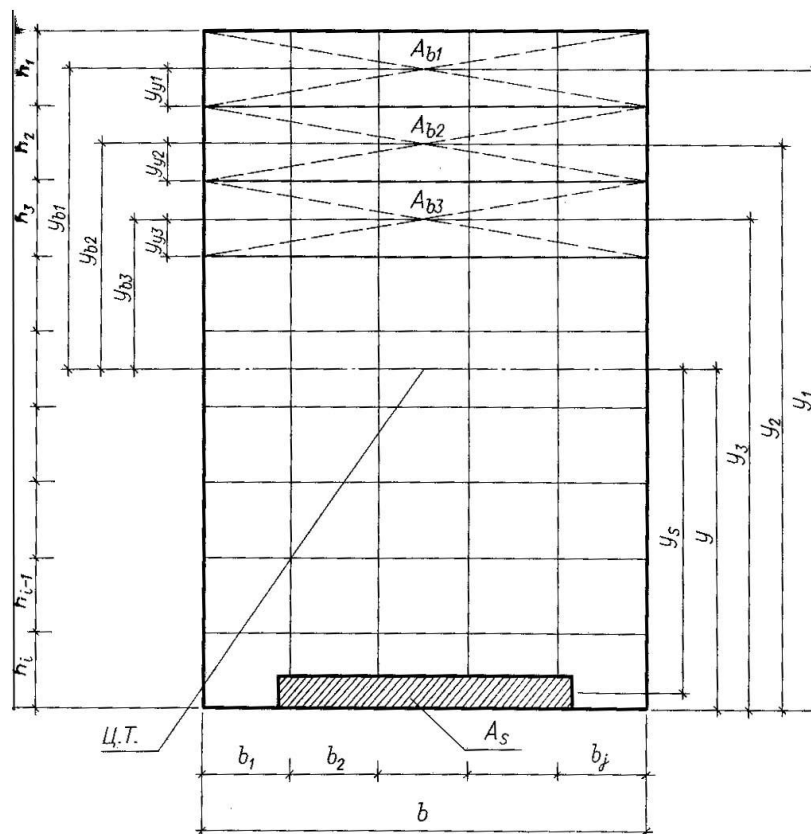


Рис. 2. Розбивання поперечного перерізу сталобетонного елемента

Для сталобетонних елементів вільну температурну кривизну з урахуванням співвідношення (3) знаходимо за формулою

$$\left(\frac{1}{r}\right)_t = \frac{\Sigma A_{red,i} y_{bi} \varepsilon_{ti} + A_{s,red} y_s \varepsilon_{st} + \Sigma \left(\frac{1}{r}\right)_{ti} I_{red,i}}{I_{red}},$$

причому видовження i -ї частини бетонного перерізу ε_{ti} , її кривизну $\left(\frac{1}{r}\right)_{ti}$ та

видовження розтягнутої арматури визначаються як

$$\varepsilon_{ti} = \frac{\alpha_{bti} f_{bi} y_{bi} + \alpha_{bt(i+1)} f_{b(i+1)} (h_i - y_{yi})}{I_{red}};$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{ti} = \frac{\alpha_{bti} f_{bi} - \alpha_{bt(i+1)} f_{b(i+1)}}{h_i};$$

$$\varepsilon_{st} = \alpha_{st} f_s \text{ - для ділянок з тріщинами;}$$

$$\varepsilon_{stm} = \alpha_{stm} f_s \text{ - для ділянок без тріщин;}$$

$I_{red} = \Sigma I_{red,i} + \Sigma A_{red,i} y_{bi}^2 + A_{s,red} y_s^2$ – момент інерції приведенного перерізу сталобетонного елемента відносно центра його ваги;

$$A_{red} = \Sigma A_{red,i} + A_{s,red} \text{ - площа приведенного перерізу сталобетонного елемента;}$$

$$y_{bi} = y_i - y = y_i - \frac{S_{red}}{A_{red}};$$

$$S_{red} = \Sigma A_{red,i} y_i + A_{s,red} \frac{\delta_s}{2}.$$

Для визначення вільної температурної кривизни необхідно також враховувати фактичний розподіл температури, тобто з урахуванням криволінійності профілю, а також фізико-механічні характеристики складових системи в умовах реальних експлуатаційних температурних навантажень. Точність цих обчислень залежить від розбивання балки на частини по висоті та ширині перерізу; мінімально припустимо розбивати перерізи по висоті на 4 частини.

Сумарні деформації розтягнутої полосової арматури складаються в основному з деформацій від прикладеного нормативного зовнішнього навантаження з урахуванням зміни властивостей арматури за умови дії вогневого впливу, температурної деформації і пластичних деформацій. Швидкість наростання прогину v_f в заданий проміжок часу вогневого впливу визначали через прогин f елемента в певний момент часу дії вогню за формулою

$$v_f = \frac{f_{\tau+\Delta\tau} - f_{\tau}}{\Delta\tau}, \quad f = \frac{5}{48} \cdot \frac{M_q l^2}{B_{red}}, \quad (4)$$

де у формулі (4) позначено:

B_{red} – приведена жорсткість перерізу;

M_q – згинний момент від зовнішнього технологічного навантаження.

Алгоритм розрахунку сталобетонних балкових конструкцій в умовах дії пожежі стандартного режиму ґрунтується на виконанні умов щодо внутрішнього моменту в заданий момент часу M_{τ} і згинного моменту від зовнішнього силового і температурного навантаження M_{qt} :

$$M_{qt} \leq M_{\tau}, \quad v_f \leq \frac{l^2}{900h},$$

а коли ці умови не виконуються, то значення часу в розрахунках зменшуємо; саме це значення часу і є тією межею, яка визначає границю вогнестійкості однопрогонової залізобетонної балки.

Результати порівняння експериментальних даних та розрахункових значень згідно пропонованої методики визначення деформативних характеристик та межі вогнестійкості для балок декількох серій наведено в табл. 1. При цьому випробувались звичайні сталобетонні балки, балки з дотиковим армуванням та з вогнезахисним зовнішнім армуванням.

Таблиця 1

Результати порівняння експериментальних даних та розрахункових значень

| Серія балок | Прогин при досягненні межі вогнестійкості, см | | | Межа вогнестійкості, год. | | |
|-------------|---|--------|------------|---------------------------|--------|------------|
| | експеримент | теорія | відхилення | експеримент | теорія | відхилення |
| Б-3-1 | 5,6 | 5,42 | 3,32% | 0,45 | 0,38 | 18,4% |
| Б-3-2 | 3,95 | 5,42 | 27,1% | 0,35 | 0,38 | 7,9% |
| Б-4-1 | 4,5 | 4,91 | 8,3% | 0,44 | 0,45 | 2,2% |
| Б-4-2 | 5,3 | 4,82 | 9,9% | 0,48 | 0,50 | 4,0% |
| Б-5-1 | 5,57 | 5,4 | 3,1 | 0,78 | 0,8 | 2,5% |
| Б-5-2 | 5,2 | 5,4 | 3,7 | 0,74 | 0,8 | 7,5% |

Зауважимо, що межа вогнестійкості балок визначалась моментом, коли зусилля в перерізах балки, яке має місце в даний момент часу, менше або рівне величин несучої здатності з урахуванням температурного впливу.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗРОБОК

Отримані розрахункові дані згідно розробленої методики визначення параметрів напружено-деформованого стану сталобетонних балкових систем в умовах пожежі та встановлені при цьому величина і швидкість наростання прогину і межі вогнестійкості вказують досить добре узгодження з експериментальними значеннями. На відміну від існуючих рекомендацій з розрахунку межі вогнестійкості розроблена методика дає більш точні значення напружень в бетоні і арматурі, а також прогинів балкової конструкцій в цілому. Встановлені результати придатні для застосувань в інженерній практиці і можуть бути рекомендованими в розрахунках міцності, жорсткості та визначення межі вогнестійкості в умовах дії пожежі стандартного режиму. Точність розрахунку за розробленою методикою значною мірою залежить від адекватності ідентифікації фізико-механічних характеристик в умовах дії підвищених рівнів температури, тобто урахування термочутливості конструкційних матеріалів, а також меж застосовності моделі тепломасопровідності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара / М.П. Вукалович. – М. : Машгиз, 1955. – 480 с.
2. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.
3. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
4. Luikov A.V. Theory of energy and mass transfer / A.V. Luikov, Yu.A. Mikhailov. – Oxford: Pergamon Press, 1965.
5. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача / В.Х. Мак-Адамс. – М. : Металлургиздат, 1961. – 400 с.
6. Новиков Н.Н. Прикладная термодинамика и теплопередача / Н.Н. Новиков, К.Д. Воскресенский. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 548 с.

7. Лучко Й.Й. Розрахункова модель дослідження тепломасообмінних процесів в бетонних будівельних конструкціях / Й.Й. Лучко, І.М. Добрянський, Є.Г. Іваник // *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. науч. тр. – Днепро-петровск : ПГАСА, 2010. – № 56. – С. 258–264.
8. Рыкалин Н.Н. Лазерная обработка материалов / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, А.Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1975. – 296 с.
9. Био М.А. Теория упругости и консолидации анизотропной пористой среды / М.А. Био // *Механика*. – 1956. – № 1. – С. 182 - 185.
10. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Б. Бартелеми, Ж. Крюппа. – М. : Стройиздат, 1985. – 256 с.
11. Kruppa I. Collapse temperature of steel structures / I. Kruppa // *Journal of the Structural Division*. –1979. – Vol. 105. – P. 1769–1788.
12. Twilt L. Fire engineering design of composite concrete slabs with profiled steel sheet / L. Twilt // *Fire-safe steel construction: practical design*. – Brussels, Luxemburg: ECSC-EEC-EAEC. – 1985. – P. 128–143.
13. Добрянський І.М. Вплив мікроструктури цементного каменю на його фізико-механічні характеристики / І.М. Добрянський, І.І. Ніконець // *Будівництво України*. – 2009. – № 3. – С. 35–36.
14. Мурашов В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона / В.И. Мурашов. – М. : Изд-во Мин. стр-ва предприятий машиностроения, 1950. – 350 с.
15. Гитман Ф.Е. Расчет железобетонных перекрытий на огнестойкость / Ф.Е. Гитман, В.Г. Олимпиев. – М. : Стройиздат, 1970. – 230 с.
16. Гринчик Ю.А. Огнестойкость железобетонных плит перекрытий по профилированному настилу / Ю.А. Гринчик, Л.В. Шейнина // *Огнестойкость строительных конструкций*. – М. : ВНИИПО, 1986. – С. 8–16.
17. Гусев А.А. Оценка свойств бетона после огневого воздействия / А.А. Гусев // *Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций: матер. семинара*. – М. – 1982. – С. 122–125.
18. Жуков В.В. Повышение предела огнестойкости монолитной плиты перекрытия по стальному профилированному настилу / В.В. Жуков, Ф.Е. Клименко, Б.Г. Демчина // *Промышленное строительство*. – 1990. – № 8. – С. 29–30.
19. Жуков В.В. Огнестойкость строительных конструкций / В.В. Жуков, В.И. Сычев // *Огнестойкость строительных конструкций (обзор)*. – М. : ЦИНИС. – 1976. – С. 21–35.

REFERENCES

1. Vukalovyich M.P. Thermodynamically properties of water and water vapour / M.P. Vukalovyich. – М.: Mashgis, 1955. – 480 p.
2. Karslow H. Heat transfer of the bodies / H. Karslow, D. Ieger. – М. : Sciences, 1964. – 487 p.
3. Luikov A.V. Theory of the heat transfer / A.V. Luikov. – М. : High school, 1967. – 600 p.
4. Luikov A.V. Theory of energy and mass transfer / A.V. Luikov, Yu.A. Mikhailov. – Oxford: Pergamon Press, 1965.
5. Mc'Adams M.X. Heatchange / V.X. Mc'-Adams. – М. : Metallurgy, 1961. – 400 p.
6. Novikov N.N. Applied thermodynamic and heat transfer / N.N. Novikov, K.D. Voskresenskyi. – М.- L. : Gosenergoisdat, 1961. – 548 p.
7. Luchko J.J. The calculations model of investigation heat-mass-transfer processes in concrete building constructions / J.J. Luchko, I.M. Dobranskyii, E.G. Ivanyk // *Building, material knowledge, mashinconstruction* : sb. nauchn. tr. – Dnepropetrovsk : PHASA, 2010. – № 56. – P. 258–264.
8. Rykalin N.N. Laser processing of materials / N.N. Rykalin, A.A. Uglov, A.N. Kokora. – М. : Mashinbuilding, 1975. – 296 p.
9. Biot M.A. The theory of the elasticity and consolidation of anisotropic porous continuum / M.A. Biot // *Mechanic*. – 1956. – № 1. – P. 182-185.
10. Bartelemy B. Firestability of the building constructions / B. Bartelemy, I. Kruppa. – М. : Stoyisdat, 1985. – 256 p.
11. Kruppa I. Collapse temperature of steel structures / I. Kruppa // *Journal of the Structural Division*. –1979. – Vol. 105. – P. 1769–1788.
12. Twilt L. Fire engineering design of composite concrete slabs with profiled steel sheet / L. Twilt // *Fire-safe steel construction: practical design*. – Brussels, Luxemburg: ECSC-EEC-EAEC. – 1985. – P. 128–143.
13. Dobranskyii I.M. The influence microstructure of concrete stone on the physic-mechanical properties / I.M. Dobranskyii, I.I. Nikonets // *Building of Ukraine*. – 2009. – № 3. – P. 35–36.
14. Murashov V.I. Crackstability, hardness and strength of ironconcrete / V.I. Murashov. – М. : Publishing Min. building business mashinbuilding, 1950. – 350 p.
15. Gitman V.E. Calculaions of the ironconcrete lay on the firestability / V.E. Gitman, V.G. Oлимпиев. – М. : Stoyisdat, 1970. – 230 p.

16. Hrynchyk J.A. Firestability of ironconcrete plate recovery by steel profile lay / J.A. Hrynchyk, L.V.Shenyna // Firestability building constructions. – M. : VNIPO, 1986. – P. 8–16.
17. Gusev A.A. The estimation properties of concrete after fire action / A.A. Gusev // The way of the firestability building material and constructions: mater. seminar. – M. – 1982. – P. 122–125.
18. Jukov V.V. The rise limit of firestability of the monolite plate recovery by steel profile lay / V.V. Jukov, V.E. Klymenko, B.H. Demchyna // Industrial building. – 1990. – № 8. – P. 29–30.
19. Jukov V.V. Firestability of the building constructions / V.V. Jukov, V.I. Sychev // Firestability of the building constructions (review). – M. : CNIIC. – 1976. – P. 21–35.

Стаття надійшла до редакції 17.03.2014 р.