

Оцінка вогневого впливу, що виникає внаслідок пожежі, на несучу здатність стін підземної частини будівлі

Віктор Носенко¹, Олег Фесенко², Тарас Донець³

^{1,2,3} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹ v.s.nosenko@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8261-1846>

² fesenko.oa@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-8154-2239>

³ t.p.donets@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-2203-5824>

DOI: 10.32347/0475-1132.45.2022.33-39

Анотація. В роботі представлено числове моделювання вогневого впливу на будівельну конструкцію внаслідок пожежі та її статичний розрахунок з урахуванням зниження фактичних характеристик матеріалів з причини дії підвищених температур.

В якості об'єкту дослідження обрано залізобетонна стіну підземної частини будівлі, що зазнає вогневого впливу з однієї сторони.

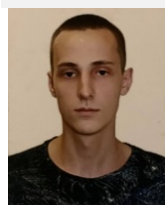
Для оцінки вогневого впливу на конструкції використано уточнені методи, які дають наближений до натурних досліджень результат. Теплофізичний розрахунок виконано в сучасному програмному комплексі ЛІРА-САПР, де є можливість моделювання трьох основних видів передачі тепла: теплопровідність, конвекція та променистий теплообмін або радіація. За результатами теплофізичного розрахунку було отримано розподіл температури в поперечному перерізі конструкції та її елементах: бетоні та арматурі. Розрахунок виконувався для 120 хв вогневого впливу конструкції за стандартним температурним режимом пожежі. На основі визначеної температури в арматурі та поперечному перерізі конструкції були визначені коефіцієнти зниження міцності арматури та бетону. Відповідно до методики, переріз було розділено на однакові зони та для кожної визначено середню температуру і міцність на стиск. Також отримана товщина пошкодженої зони a_z з боку вогневого впливу та побудовано приведений поперечний переріз, який не включає пошкоджену зону.



Віктор Носенко
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н.



Олег Фесенко
доцент кафедри залізобетонних
і кам'яних конструкцій,
к.т.н.



Тарас Донець
магістр кафедри
геотехніки.

Статичний розрахунок виконано за методикою розрахунку для нормальних температур. Для розрахунку було використано деформаційний метод, який враховує деформації бетону на кожній ітерації. Була визначена нормальна сила, що діє по довжині 1 м.п. стіни після вогневого впливу з урахуванням зниження характеристики міцності матеріалів та за нормальної температури і побудовані відповідні діаграми.

Ключові слова: вогневий вплив пожежі; стіна підземної частини; чисельні методи; теплофізичний розрахунок; несуча здатність.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В сучасному будівництві зберігається тенденція до максимальної оптимізації доцільного використання матеріалів. Для цього необхідно при проектуванні конструкцій враховувати всі можливі негативні фактори на умови її роботи. Одним з таких факторів може бути пожежа на будівельному майданчику, під час експлуатації будівлі або її виникнення внаслідок надзвичайної ситуації.

Дослідження вогневого впливу на несучу здатність конструкції стає можливим з появою сучасних програмних комплексів та відповідних методик розрахунку.

МЕТА РОБОТИ

Дослідження числовими методами вогневого впливу на стіну підземної частини в зв'язку з можливістю виникнення пожежі під час експлуатації або внаслідок надзвичайних ситуацій та оцінка величини зниження несучої здатності конструкції.

ЗАДАЧІ

- 1) Теплофізичний розрахунок конструкції;
- 2) Визначення фактичних характеристик матеріалів при підвищених температурах внаслідок вогневого впливу;
- 3) Статичний розрахунок за нормальної температури та з урахуванням вогневого впливу внаслідок пожежі.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Уточнені розрахункові методи забезпечують найбільш реалістичний результат розрахунку конструкцій, що зазнають вогневого впливу. Методи базуються на фундаментальній фізичній роботі таким чином, щоб забезпечити прийнятний рівень наближення результатів розрахунку до очікуваної поведінки окремої конструкції під час пожежі. Уточнені методи розрахунку включають розрахункові моделі для визна-

чення:

- зростання та розподілення температури в конструкції (теплотехнічний розрахунок);
- механічної роботи конструкції (статичний розрахунок).

Розрахунки конструкцій уточненими методами виконують із застосуванням просторових комп'ютерних моделей, що розроблені у програмних комплексах, реалізованих на основі методу скінченних елементів (МСЕ) у формі переміщень. Розрахунок виконується на дію теплових впливів та статичного навантаження під час пожежі.

Теплофізичний розрахунок було виконано в ПК ЛІРА-САПР, в якому реалізовано метод скінченних елементів та присутній необхідний для моделювання набір скінченних елементів.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження вогневого впливу була обрана стіна підземної частини будівлі з поперечним перерізом $h \times b = 250 \times 1000$ мм, бетоном класу С20/25, армуванням – $\text{Ø}14$ А500С кр. 200 мм, відстань до центру ваги арматури становить 40 мм. Поперечний переріз стіни наведено на Рис. 1.

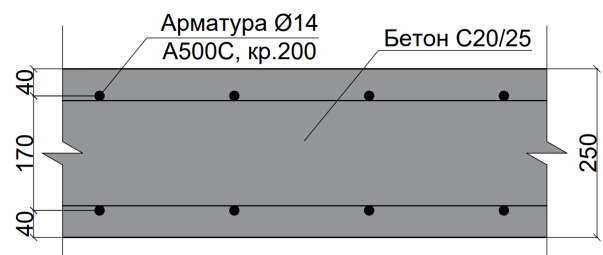


Рис.1. Поперечний переріз стіни.

Fig.1 Cross-section of a wall.

Розрахунок виконувався для 120 хв вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Стандартний температурний режим – зміна температури в часі при випробуваннях конструкцій на вогнестійкість, який визначається залежністю:

$$T_s = 345 \lg(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

де, t – тривалість випробувань, хв;

T_s – температура, яка відповідає часу t , °С

Для побудови розрахункової схеми та задавання граничних умов була обрана 15-а ознака схеми “одна степінь вільності у вузлі – температура (t)”. Вогневий вплив здійснюється тільки з однієї сторони. Постановка задачі була плоскою (2D) для спрощення тривалості та трудомісткості розрахунків, оскільки результати такі ж як і при просторовому моделюванні.

При моделюванні розрахункової схеми було враховано три основні види передачі тепла:

1 – теплопровідність (реалізована у вигляді жорсткості для елементів) (Рис. 2.);

2 – конвекція (контактні двовузлові скінченні елементи, коефіцієнт конвекції $a = 25 \text{ Дж}/(\text{м}^2\text{с}^\circ\text{C})$) (Рис.2.);

3 – променистий теплообмін або радіація (“навантаження виду тепловий потік на вузол”, коефіцієнт поглинання – 0,8).

Скінченно-елементна (СЕ) розрахункова модель складається з 440 елементів та 451 вузла та наведена на Рис. 2.

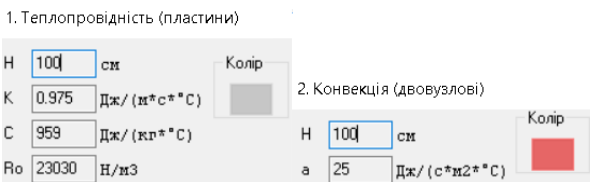
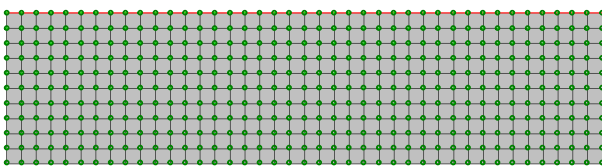


Рис.2. Загальний вигляд СЕ моделі поперечного перерізу стіни та задані жорсткості елементів.

Fig.2. General view of the finite element model of the cross section of the wall and the specified stiffnesses of the elements.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО РОЗРАХУНКУ

В результаті виконаного теплофізичного розрахунку, із урахуванням рекомендацій [9, 16], було отримано розподіл температури в поперечному перерізі стіни підземної частини будівлі після 120 хв вогневого впливу (Рис. 2). Температура в арматурі

конструкції з боку вогневого впливу внаслідок пожежі становить $\theta_{arm} = 545^\circ\text{C}$ (Рис. 3).

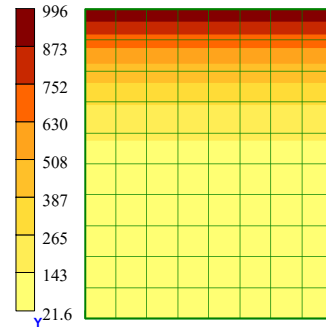


Рис. 3. Розподіл температури в поперечному перерізі стіни після 120 хв вогневого впливу.

Fig.3. Temperature distribution in the cross-section of the wall after 120 minutes of fire exposure.

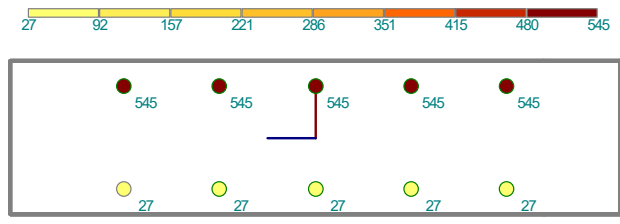


Рис. 4. Розподіл температури в арматурі конструкції після 120 хв вогневого впливу.

Fig.4. Temperature distribution in the reinforcement of the structure after 120 minutes of fire exposure.

ФАКТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Згідно рекомендацій [16] для визначення зниження характеристики міцності матеріалів поперечний переріз ділиться на $n \geq 3$ паралельних зон однакової товщини. В цих зонах враховується середня температура та відповідний середній опір на стиск $f_{cd}(\theta)$.

Пошкоджений під час пожежі поперечний переріз представлений приведеним поперечним перерізом, який не включає товщину пошкодженої зони a_z обігріваної поверхні (Рис. 5). Приведення поперечного перерізу базується на визначенні товщині a_z пошкодженої зони обігріваної поверхні.

СТАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК

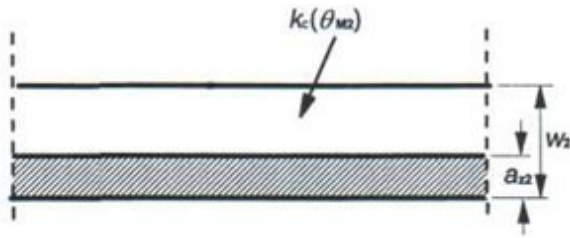


Рис. 5. Приведений поперечний переріз стіни.
Fig.5. A cross-section the wall.

Визначається відповідний коефіцієнт зниження міцності бетону на стиск $k_c(\theta_i)$ в точці М (Рис. 6).

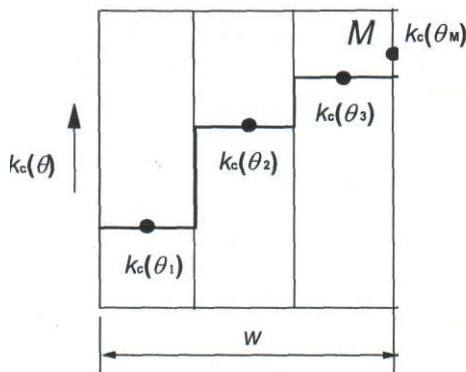


Рис. 6. Поділ поперечного перерізу стіни на зони.
Fig.6. Divide cross-section of the wall into zones.

Середній коефіцієнт зниження міцності бетону в точці М для визначеної частини включаючи коефіцієнт $(1-0,2/n)$, що враховує при розрахунку зміну температури кожної зони розраховують за формулою:

$$k_{c,m} = \frac{(1-0,2/n)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \tag{2}$$

де, n – кількість паралельних зон;
 w – товщина стіни;
 m – кількість зон.

Ширину пошкодженої зони визначають за формулою:

$$a_z = w \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right] \tag{3}$$

Після виконання розрахунків було визначено коефіцієнти зниження міцності матеріалів конструкції:

- бетону ($k_{c,m} = 0,622$);
- арматури ($k_s(\theta) = 0,464$).

Статичний розрахунок виконується за методикою розрахунку за нормальних температур деформаційним методом. Деформаційний метод – це ітераційний нелінійний метод розрахунку, результатом якого є побудова графіку залежності «поздовжня сила – кривизна». Сутність методу полягає в тому, що покроково здійснюється приріст деформації в поперечному перерізі елемента до граничної деформації стиску бетону $\epsilon_{cu,cd}$.

Значення нормальної сили, що діє по довжині 1 м.п. стіни після вогневого впливу з урахуванням зниження характеристики міцності матеріалів та за нормальної температури наведено на діаграмах (Рис. 7-8).

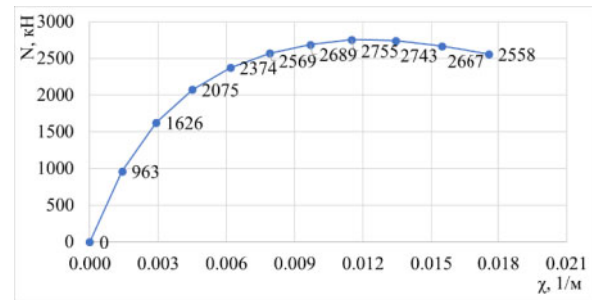


Рис. 7. Діаграма «поздовжня сила – кривизна» перерізу стіни за нормальної температури.

Fig.7. Diagram "axial force - curvature" of the cross-section of the wall at normal temperature.

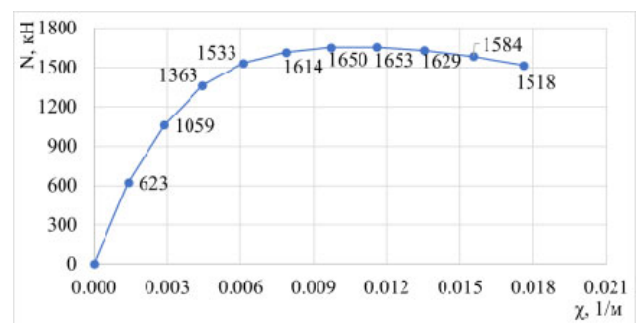


Рис. 8. Діаграма «поздовжня сила – кривизна» перерізу стіни після 120 хв вогневого впливу.

Fig.8. Diagram "axial force - curvature" of the wall section after 120 minutes of fire exposure.

Найбільше значення на діаграмах прийняте за несучу здатність стіни:

$N_{Rd} = 2755 \text{ кН/м}$ – за нормальної температури;

$R_{d,fi} = 1653 \text{ кН/м}$ – внаслідок вогневого впливу.

Несуча здатність внаслідок вогневого впливу зменшилась на **40%**.

ВИСНОВКИ

Показано, що внаслідок вогневого впливу пожежі на конструкцію фізико-механічні характеристики матеріалів знижуються на 50%.

Встановлено, що несучу здатність стіни підземної частини будівлі після 120 хв вогневого впливу знизилася на 40% відносно величини несучої здатності за нормальної температури.

Рекомендовано при проектуванні конструкції, що можуть зазнавати вогневих впливів розглянути варіанти:

а) збільшення захисного шару бетону, що позитивно впливає на зменшення температури у арматурі;

б) влаштування вогнезахисного покриття конструкції;

в) збільшення діаметру робочого армування.

В перспективі подальших досліджень планується:

1) визначення несучої здатності та межі вогнестійкості для інших конструкцій (перекриття, колони, балки тощо);

2) уніфікація та зменшення термінів моделювання і виконання розрахунків шляхом оптимізації розрахункових моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures / Kodur V. // *ISRN Civil Engineering* 2014. 1- 15.
2. Gao W.Y. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire / W.Y. Gao, J.-G. Dai, J.G. Teng, G.M. Chen // *Engineering Structures*, - 2013, - 52, pp. 488-501.
3. Achenbach M. Identification of the thermal properties of concrete for the temperature calculation of concrete slabs and columns subject-

ed to a standard fire – Methodology and proposal for simplified formulations / M.Achenbach, T. Lahmer, G. Morgenthal // *Fire Safety Journal*, - 2017, - 87, pp. 80-86

4. Shyamala G. Thermal behavior of Concrete subjected to elevated temperature: Case Studies / G. Shyamala, V. Mahesh, K. Rajesh Kumar, I. Rajasri Reddy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, - 2020. - 981 (3), art. no. 032068
5. Anupama Krishna D. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete / D. Anupama Krishna, R.S. Priyadarshini, S. Narayanan // *Procedia Structural Integrity*, - 2019. - 14, pp. 384-394.
6. Lamont, S. Behavior of structures in fire and real design - A case study / S. Lamont, B. Lane, G. Flint, A. Usmani // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 2006. – 16 (1), pp. 5-35.
7. Поклонський В. Розрахунок залізобетонних конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 2 / В.Г. Поклонський, О.А. Фесенко, В.Г. Тарасюк, Ю.І. Немчинов, Х.З. Байтала // *Практичний посібник*. Київ: Інтертехнологія, 2016. - 83 с.
8. Колякова В. М. Розподіл температури в перерізі залізобетонної плити / В.М. Колякова, М.О. Божинський, О.А. Фесенко // *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк: ЛНТУ. – 2016. №5. - С.232-239
9. Барашиков А.Я. Теплотехнічні властивості бетону / А.Я. Барашиков, В.М. Колякова, Н. Халік // *Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць*. Рівне: НУВГП. – 2008. – С. 3-7.
10. Колякова В.М. Розрахунково-теоретичні дослідження розподілу температури в перерізі залізобетонної конструкції східчастих складок. / В.М. Колякова, М.О. Божинський // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. - Вип. № 1 (2017). - С. 149-157.
11. Поклонський В.Г. Розрахункові методи оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за Єврокодами / В.Г. Поклонський, О.А. Фесенко, Х.З. Байтала, П.В. Круковський, С.В. Новак // *Будівельні конструкції*. К., ДП НДІ-БК. - 2016. - Вип.83 (2). - с. 380-389.
12. Бакін П.І. Визначення вогнестійкості будівельних конструкцій розрахунковими методами відповідно до стандартів, що впроваджують Єврокоди / П.І. Бакін, Ю.І. Немчинов, В.Г. Поклонський, Р.В. Расюк, В.Г. Та-

- расюк, О.А. Фесенко // *Світ геотехніки*. Вип. 1. 2011. – С. 12-15.
13. Дмитренко Є.А. Оцінка вогнестійкості залізобетонних колон уточненими розрахунковими методами / Є.А. Дмитренко, Т.П. Донець, К.О. Одноліток, О.А. Фесенко // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. – К.: КНУБА. - 2021. - № 8. - с. 82-96.
 14. Байтала Х.З. Практична реалізація уточнених методів розрахунку будівельних конструкцій на вогнестійкість / Х.З. Байтала, П.І. Бакін, Т.П. Донець, О.А. Фесенко // *Збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції «Агроінженерія: сучасні проблеми та перспективи розвитку», присвячена 90-й річниці з дня заснування механіко-технологічного факультету НУ-БіП України*. - К., НУБіП України. - 2019. - с.238-240.
 15. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, ІДТ): ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 – [Чинні 2013-07-01]. – К.: Мінрегіон України, 2012. – 87с. – (Національний стандарт України).
- REFERENCES
1. Kodur V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*. doi: 10.1155/2014/468510 (in English).
 2. Gao, W.Y., Dai, J.-G., Teng, J.G., Chen, G.M. (2013). Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures*, 52. 488-501. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.03.017 (in English).
 3. Achenbach, M., Lahmer, T., Morgenthal, G. (2017). Identification of the thermal properties of concrete for the temperature calculation of concrete slabs and columns subjected to a standard fire – Methodology and proposal for simplified formulations. *Fire Safety Journal*, 87, pp. 80-86. doi: 10.1016/j.firesaf.2016.12.003 (in English)
 4. Shyamala, G., Mahesh, V., Rajesh Kumar, K., Rajasri Reddy, I. (2020). Thermal behavior of Concrete subjected to elevated temperature: Case Studies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 981 (3), art. no. 032068. doi: 10.1088/1757-899X/981/3/032068 (in English)
 5. Anupama Krishna, D., Priyadarsini, R.S., Narayanan, S. (2019). Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete. *Procedia Structural Integrity*, 14, pp. 384-394. doi: 10.1016/j.prostr.2019.05.047
 6. Lamont, S., Lane, B., Flint, G., Usmani, A. (2006). Behavior of structures in fire and real design - A case study. *Journal of Fire Protection Engineering*, 16 (1), pp. 5-35. (in English)
 7. Poklonskyi V.H., Fesenko O.A., Tarasiuk V.H., Nemchynov Yu.I., Baitala Kh.Z. i in. (2016). Rozrakhunok zalizobetonnykh konstrukttsii na vohnestiikist vidpovidno do Yevrokodu 2 [Calculation of reinforced concrete structures for fire resistance in accordance with Eurocode 2]. *Praktychnyi posibnyk*. Kyiv: Intertekhnolohiia. 83. (in Ukrainian).
 8. Koliakova V.M., Bozhynskyi M.O., Fesenko O.A. (2016). Rozpodil temperatury v pererizi zalizobetonnoi plyty [Temperature distribution in the cross-section of a reinforced concrete slab]. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. Lutsk: LNTU. №5.-232-239 (in Ukrainian).
 9. Barashykov A.Ia., Koliakova V.M., Khalik N. (2008). Teplotekhnichni vlastyvoli betonu [Thermotechnical properties of concrete]. *Zb. nauk. prats. Resursoekonomni materialy, konstrukttsii, budivli ta sporudy*. Rivne: NUVHP. 3-7. (in Ukrainian).
 10. Koliakova V.M., Bozhynskyi M.O. (2017). Rozrakhunkovo-teoretychni doslidzhennia rozpodilu temperatury v pererizi zalizobetonnoi konstrukttsii skhidchastykh skladok [Computational and theoretical studies of temperature distribution in the cross-section of a reinforced concrete structure with stepped folds]. *Budivelni konstrukttsii. Teoriia i praktyka*. Vyp. № 1 (2017). 149-157 (in Ukrainian).
 11. Poklonskyi V.H., Fesenko O.A., Baitala Kh.Z., Krukovskyi P.V., Novak S.V. (2016). Rozrakhunkovi metody otsinky vohnestiikosti budivelnnykh konstrukttsii za Yevrokodamy [Calculation methods for assessing the fire resistance of building structures according to Eurocodes]. *Budivelni konstrukttsii*. K., DP NDIBK. Vyp.83 (2). 380-389 (in Ukrainian).
 12. Bakin P.I., Nemchynov Yu.I., Poklonskyi V.H., Rasiuk R.V., Tarasiuk V.H., Fesenko O.A. (2011). Vyznachennia vohnestiikosti budivelnnykh konstrukttsii rozrakhunkovymy metodamy vidpovidno do standartiv, shcho vprovadzhuiut Yevrokody [Determination of fire resistance of

- building structures by calculation methods in accordance with the standards implementing Eurocodes]. *Svit heotekhniky*. Vyp. 1. 12-15 (in Ukrainian).
13. Dmytrenko Ye. A., Donets T. P., Odnolitok K.O., Fesenko O.A. (2021). Otsinka vohnestiikosti zalizobetonnykh kolon utochnenymy rozrakhunkovymy metodamy [Evaluation of fire resistance of reinforced concrete columns by refined calculation methods]. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*. – K.: KNUBA. 8. 82-96. doi: 10.32347/2522-4182.8.2021.82-96 (in Ukrainian).
14. Baitala Kh.Z., Bakin P.I., Donets TP, Fesenko O.A. (2019). Praktychna realizatsiia utochneniykh metodiv rozrakhunku budivelnykh konstruksii na vohnestiikist [Practical implementation of refined methods of calculating building structures for fire resistance]. *Zbirnyk tez dopovidei II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Ahroinzheneriia: suchasni problemy ta perspektyvy rozvytku», prysviachena 90-y richnytsi z dnia zasnuvannia mekhaniko-tekhnolohichnoho fakultetu NUBiP Ukrainy*. K. NUBiP Ukrainy. 238-240 (in Ukrainian).
15. Eurocode 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstruksii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhenia. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist [Design of reinforced concrete structures. Part 1-2. Terms. Calculation of structures for fire resistance]. (EN 1992-1-2:2004, IDT): DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 – [Chynni 2013-07-01]. – K.: Minrehion Ukrainy, 2012. 87. (Natsionalnyi standart Ukrainy). (in Ukrainian).

Assessment of fire exposure on the load bearing capacity of basement storey walls

Viktor Nosenko
Oleg Fesenko
Taras Donets

Summary. This paper presents the numerical modelling of the fire exposure on structural element and its static analysis taking account of the material properties reduction due to elevated temperature.

The reinforced concrete wall of basement storey was subjected to one side fire exposure.

Advanced calculation methods were used to assess the fire exposure on the structural element as most reliable and approximate to fire test results. Thermal analysis was performed with LIRA-CAD software by the simulating of three main heat-transfer ways: thermal conductivity, convection and radiation. As a result of the thermal analysis, temperature distribution in the concrete and reinforcement parts of the structural element cross-section was obtained. The thermal analysis of the wall structural element was performed for 120 minutes in standard fire exposure. Reduction factors for the strength of concrete and reinforcement steel were determined based on the temperature distribution in the wall structural element cross-section. The cross-section is divided into a number of parallel zones of equal thickness where the mean temperature and the corresponding mean compressive strength is assessed according to the Zone method procedure. The fire damaged zone of thickness a_z at the fire exposed sides and reduced cross-section were obtained.

Static analysis of the wall load-bearing capacity was performed using the procedure applicable for normal temperature design. The Deformation method for normal temperature design taking to account concrete deformation was used. The Deformation method for normal design taken to account concrete deformation at every step of iteration was used. The reduced load-bearing capacity of the fire damaged wall taking into account residual concrete strength was calculated and relevant load-bearing capacity diagrams were determined.

Keywords. fire exposure; basement storey wall; numerical methods, thermal analysis; load bearing capacity.