

doi.org/10.29295/2311-7257-2021-104-2-221-226

УДК 624.012:53.09

**Фомін С.Л., Бутенко С.В., Плахотнікова І.А., Колесніков С.М.**

*Харківський національний університет будівництва та архітектури*

*(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: sfomin@ukr.net, ira5657@gmail.com,*

*svbusan87@gmail.com, 555ksn555@gmail.com; orcid.org/0000-0001-9146-0464,*

*orcid.org/0000-0002-6083-7668, orcid.org/0000-0003-1986-4215, orcid.org/0000-0002-2090-9647)*

## **ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬ В СТАТИЧНІЙ ТА ДИНАМІЧНІЙ ПОСТАНОВКАХ**

Стаття розглядає розрахунок вогнестійкості як динамічну задачу, тобто таку яка змінюється з часом. Розглянуто теоретичний апарат, що використовується для такого роду задач, наведено теоретичні викладки та рівняння для теплотехнічного та статичного розрахунків. Сформульовано підхід до розрахунку вогнестійкості з позицій динаміки споруди. Наведено основні формули розрахунку.

**Ключові слова:** розрахунок вогнестійкості, будівельна механіка, теплотехнічний розрахунок, статичний розрахунок, розрахунок в динамічній постановці.

**Вступ.** Сучасна тенденція до зведення висотних багатоповерхових будівель, таких як висотні житлові будівлі, висотні офісні центри та громадські будівлі, ставить перед конструкторами та проектувальниками нові інженерно-технічні завдання та посилює вимоги до такого типу будівель. В основному такі будівлі мають залізобетонний несучий каркас, завдання якого протидіяти зовнішнім та внутрішнім навантаженням протягом всього терміну експлуатації будівлі, а також зберігати несучу здатність під час виникнення аварійних ситуацій, весь час або певний проміжок часу тривалості аварії [1, 2]. Однією з таких ситуацій є пожежа, що має незворотній вплив на залізобетонні конструкції. Тому вогнестійкість залізобетонної будівлі має бути повністю забезпечена, адже вона є останнім рубежем, у випадку неспрацювання або відмови протипожежних систем [3], для забезпечення евакуації людей [4] та безпеки пожежників при гасінні пожежі.

У сучасній будівельній науці розроблено декілька методик для розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій, що викладені в нормах проектування [5-7], та ряд методик [8], що не увійшли в останні. В нормах проектування [5] методики класифіковано як табличні методи, спрощені методи розрахунку та уточнені моделі розрахунку. Найточнішими вважаються останні, оскільки тільки вони враховують роботу будівлі чи конструкції під час пожежі в цілому.

Мета даної статті – формулювання теоретичних підходів до розрахунку вогнестійкості залізобетонних будівель з погляду статичної та динамічної будівлі чи споруди, як одних з уточнених методів розрахунку.

**Матеріали і методи досліджень.** В даній статті використовувались теоретичні напрацювання будівельної механіки, механіки деформованого тіла та математичної фізики, а саме метод скінченних елементів, диференціальне рівняння теплопровідності, рівняння динаміки будівлі.

**Результати дослідження.** У відповідності з нормами проектування [5-7] методами та методами розрахунку на вогнестійкість залізобетонних конструкцій, що дають найточніші результати, вважають уточнені моделі розрахунку, що містять в собі загальний аналіз конструктивної схеми будівлі. Нормами [5] сформульовано тільки вимоги до них, а саме, що треба враховувати характерний вид відмови під час пожежі, властивості матеріалу, залежні від температури, жорсткість елемента, розповсюдження тепла й температурні деформації. Уточнені моделі розрахунку мають базуватись та включати в себе теплотехнічний розрахунок та статичний розрахунок [5].

**Теплотехнічний розрахунок.** Суть теплотехнічного розрахунку полягає у визначенні температурних полів в розрахункових перерізах конструкції, яка обігривається.

Температурним полем називається сукупність значень температури в даний момент часу для всіх точок простору, які характеризуються координатами.

При впливі на конструкцію обігрівуючого середовища, температурне поле також змінюється в часі, тобто є нестационарним.

Температурне поле може бути функцією трьох, двох і однієї координат. Відповідно воно називається трьох-, двох- і одновимірним, а його математичний вираз з урахуванням фактору часу має наступний вигляд [9]:

$$\Theta = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

$$\Theta = f(x, y, t) \quad (2)$$

$$\Theta = f(x, t) \quad (3)$$

де,  $\Theta$  – температура,  $x, y, z$  – координати,  $t$  – час

У більшості випадків при вирішенні теплотехнічної задачі в конструкціях визначається одновимірне (безригельні перекриття, плити, стіни, перегородки) - формула (3) або двовимірне температурні поля (колони, балки, ферми) - формула (2). Тривимірні поля мають місце у вузлах з'єднання конструкцій, а також у складних випадках розташування конструкцій в кутових місцях - формула (1).

Розрахунок температур виконується із застосуванням диференціального рівняння теплопровідності Фур'є [9]:

для тривимірного температурного поля

$$C\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial \Theta}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial \Theta}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial \Theta}{\partial z} \left[ \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right] \quad (4)$$

для двовимірного температурного поля для перерізу в площині

$$C\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial \Theta}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial \Theta}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right] \quad (5)$$

для одновимірного температурного поля вздовж осі

$$C\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial \Theta}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right] \quad (6)$$

де  $C$  – питома теплоємність;  $\rho$  – густина матеріалу;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

В рівняннях (4-6) теплоємність, густина та коефіцієнт теплопровідності не є константами й залежать від температури, для бетону визначаються з даних, наведених в нормах проектування. Диференціальні рівняння теплопровідності Фур'є (4-6) є нелінійними, тому що змінюється не тільки температура нагрівуючого середовища, але й теплофізичні характеристики матеріалу.

Для вирішення диференціальних рівнянь теплопровідності Фур'є необхідно задатися крайовими умовами, що складаються з початкових і граничних умов. До початкових умов відноситься розподіл і значення температури в конструкції до пожежі. У всіх точках перерізів конструкції значення початкової температури приймається рівною 20 °С.

Граничні умови дозволяють визначити закономірності теплообміну між нагрівуючим середовищем і поверхнею конструкції. Для теплотехнічного розрахунку будівельних конструкцій використовуються граничні умови 1-го, 2-го і 3-го роду.

Граничні умови 1-го роду характеризуються завданням зміни температури на поверхні конструкції; граничні умови 2-го роду характеризуються завданням зміни щільності теплового потоку, що надходить до поверхні конструкції; граничні умови 3-го роду характеризуються завданням закону зміни температури нагрівуючого середовища (від часу дії

пожежі й коефіцієнта теплообміну між нагріваючим середовищем і поверхнею конструкції) [9].

В деяких простих або спрощених випадках рівняння теплопровідності можливо вирішити аналітично. Зазвичай це одновимірні температурні поля з граничними умовами 1-го роду. При сучасному розвитку комп'ютерної науки чисельне рішення рівняння теплопровідності для будь-якого випадку отримати не складно [10]. Це реалізується методом скінченних елементів в багатьох розрахункових комплексах, практично в будь-якій постановці від одновимірного до тривимірного теплового поля, наприклад ЛІРА, MATLAB, ANSYS, ABAQUS та інші.

**Статичний розрахунок.** Уточнені методи розрахунку для статичного розрахунку базуються на визначених принципах та припущеннях будівельної механіки [11], враховуючи зміну механічних властивостей від температури. Норми проектування [5] вимагають враховувати температурні деформації та напруження, спричинені як підвищенням, так і перепадами температур. Значення деформацій для граничного стану, встановлені методами розрахунку, мають обмежуватись настільки, наскільки це потрібно для забезпечення просторової жорсткості конструкцій. Якщо необхідно, при статичному розрахунку враховують геометричну нелінійність. Повну деформацію  $\varepsilon$  визначають із виразу:

$$\varepsilon = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{tr} \quad (7)$$

де  $\varepsilon_{th}$  – температурна деформація;  $\varepsilon_{\sigma}$  – миттєва деформація, що залежить від напруження;  $\varepsilon_{creep}$  – деформація повзучості;  $\varepsilon_{tr}$  – тимчасова деформація.

Суть статичного методу полягає в тому, що споруда розглядається в рівновазі зовнішніх навантажень та внутрішніх сил. На рис. 1 наведено графічне відображення статичного розрахунку вогнестійкості залізобетонної конструкції.

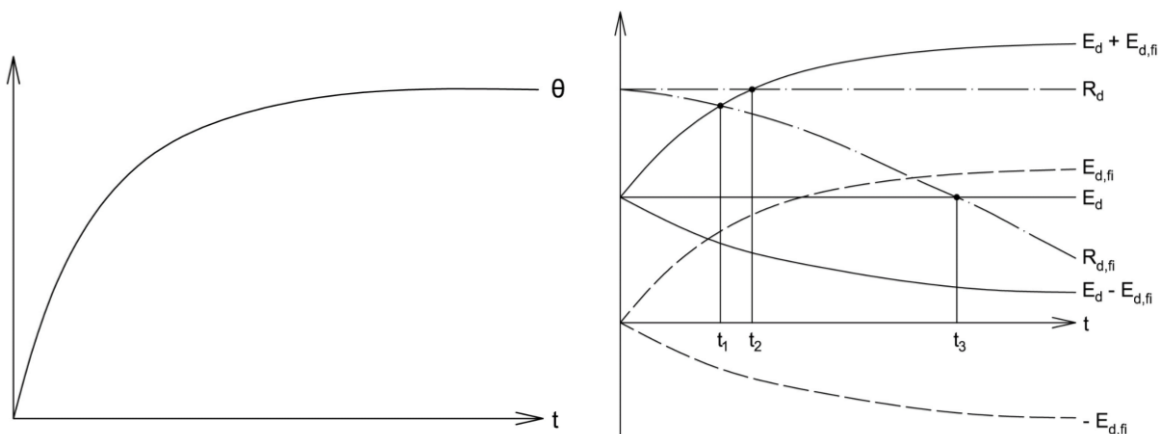


Рис. 1. Графічне зображення статичного розрахунку:  $\theta$  – температура,  $t$  – час,  $R_d$  – розрахунковий опір елементу при нормальних умовах,  $E_d$  – розрахунковий навантажувальний ефект на елемент при нормальних умовах,  $R_{d,fi}$  – розрахунковий опір елементу під час пожежі,  $E_{d,fi}$  – розрахунковий навантажувальний ефект на елемент під час пожежі,  $R_d$  – розрахунковий опір елементу при нормальних умовах.

З плином часу середня температура  $\theta$  елементу конструкції зростає, що в свою чергу веде до зміни навантажувального ефекту  $E_{d,fi}$ , спричиненого пожежею. Важливо відмітити, що навантажувальний ефект  $E_{d,fi}$  може як збільшувати загальне навантаження на елемент  $E_d + E_{d,fi}$ , так і зменшувати  $E_d - E_{d,fi}$  його, коли відбувається розвантаження елементу через перерозподіл зусиль між елементами конструкції. Наприклад, деякі колони можуть бути розтягненими, оскільки сусідні колони мають більшу температуру і, відповідно, більше теплове розширення, що веде до перерозподілу зусиль.

Розрахунковий опір елементу під час пожежі  $R_{d,fi}$  через нагрів починає зменшуватись, оскільки з підвищенням температури знижуються всі механічні властивості бетону й арматурної сталі (модуль пружності, міцність на стиск для бетону та міцність на розтяг для арматури).

Таким чином, через деякий проміжок часу  $t_1$  опір елементу  $R_{d,fi}$  стане рівним загальному навантаженню на елемент  $E_d + E_{d,fi}$ :

$$R_{d,fi} = E_d + E_{d,fi} \quad (8)$$

Отже час  $t_1$  і буде межею вогнестійкості елементу конструкції, а в деяких випадках конструкції або будівлі в цілому. Слід зауважити, що якщо знехтувати при розрахунках зменшення опору елементу  $R_{d,fi}$  або збільшення загального навантаження на елемент  $E_d + E_{d,fi}$  то розрахунки будуть невірні й вогнестійкість елементу матиме значення  $t_2$  і  $t_3$  відповідно.

Таким чином, статичний розрахунок зводиться до вирішення двох задач: знаходження зниження опору елементу  $R_{d,fi}$  й збільшення загального навантаження на елемент  $E_d + E_{d,fi}$  з часом. Обидві задачі включають в себе ряд дискретних розрахунків через проміжки часу, що відповідають нормованій вогнестійкості, з наступною побудовою графіків та знаходження їх точки перетину.

**Динамічна постановка задачі.** Динамічний підхід базується на законі збереження енергії, згідно якого сума потенційної та кінетичної енергії пружної системи в будь-який момент часу є постійною величиною [11, 12]. В загальному вигляді рівняння задачі в динамічній постановці має вигляд [13]:

$$M \frac{d^2u}{dt^2} + C \frac{du}{dt} + Ku = P \quad (9)$$

де  $M$  – матриця мас конструкції;  $C$  – матриця демпфірування конструкції;  $K$  – матриця жорсткості конструкції;  $\frac{d^2u}{dt^2}$  – вектор прискорень вузлів конструкції;  $\frac{du}{dt}$  – вектор швидкостей вузлів конструкції;  $u$  – вектор переміщень вузлів конструкції;  $P$  – вектор вузлових навантажень

Якщо вектор вузлових навантажень не змінюється в часі, то маємо статичну задачу [13]:

$$Ku = P \quad (10)$$

В динамічній постановці задачі за розрахунком вогнестійкості вектор вузлових навантажень набуває вигляду:

$$P = P_{st} + P_{fire} \quad (11)$$

де  $P_{st}$  – вузлові статичні навантаження (власна вага, корисне навантаження);  $P_{fire}$  – вузлові навантаження, спричинені пожежею.

В свою чергу вузлові навантаження, спричинені пожежею, є залежними від температури елементу  $\theta$ , яка залежна від часу формули (1) – (3). Матриця мас конструкції, в свою чергу, також є залежною від часу, оскільки бетон з нагріванням втрачає вологу і його маса зменшується, але не суттєво. Матрицею демпфірування можна знехтувати при розрахунках на вогнестійкість, хоча при розрахунку таких динамічних задач, як вітрове навантаження, матриця демпфірування має враховуватись як найточніше. Щодо матриці жорсткості конструкції залізобетонні елементи при нагріванні втрачають свою жорсткість з підвищенням температури, яка в свою чергу залежна від часу. Точніше, матриця жорсткості залежить від фізико-механічних властивостей бетону й арматурної сталі (модуль

пружності, границя пропорційності, текучості та інші), які змінюються з температурою, що в свою чергу змінюються з часом. Таким чином, при динамічній постановці розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій рівняння (9) набуває наступного вигляду:

$$M(t) \frac{d^2u}{dt^2} + K(t)u = P_{st} + P_{fire}(t) \quad (12)$$

Отже, рішення задачі із розрахунку вогнестійкості в динамічній постановці зводиться до знаходження часових залежностей матриці мас, матриці жорсткості й вузлових навантажень. Рішення рівняння (12) аналітичним шляхом на сучасному розвитку науки неможливе. Але, рішення за допомогою числових методів, є реальним. Рішення рівняння (12) можливе моделюванням методом скінченних елементів [13, 14] в таких розрахункових комплексах, як ANSYS, ABAQUS.

**Обговорення результатів.** Результати теоретичного дослідження можуть бути використані при подальшій розробці програмних комплексів, що дозволяють розраховувати та моделювати реальну роботу залізобетонних конструкцій під час пожежі, окреслюються можливі напрямки для розробки теоретичного апарату розрахунку на вогнестійкість залізобетонних конструкцій.

**Висновки.** Розглянуто актуальність задачі вогнестійкості. Показано можливі різні підходи до розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій уточненими методами.

Розглянуто теплотехнічний розрахунок як невід’ємну частину розрахунків на вогнестійкість. Показано три основні варіанти розрахунку – одно-, двох- і тривимірний.

Наведено основи статичного розрахунку та графічно викладено його суть.

Показано основи динамічного підходу при розрахунку вогнестійкості залізобетонних будівель і сформульовано основні положення й напрямки для подальших теоретичних досліджень.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Rein G., Zhang Xun, Williams P., Hume B., Heise A., Jowsey A., Lane B., Torero J. Multi-story Fire Analysis for High-Rise Buildings. 11th Interflam, London. 2007. P. 605-616.
2. Fire Safety Design for Tall Buildings. Feng Fu. First edition published. 2021 by CRC Press.
3. Нестеренко О.В., Лебедева О.С., Чернищенко Г.О., Зайцева В.Г. Профілактичні методи попередження пожеж у житлових будинках підвищеної поверховості. Науковий вісник будівництва. 2019. Т. 98. № 4. С. 298-305.
4. Хілько Ю. В., Тригуб В. В., Грицина І. М. Моделювання безпечної евакуації людей з висотних будівель при пожежі. Науковий вісник будівництва. 2017. Т. 90. №4. С. 267-271.
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. ДСТУ-Н Б В.2.6-196:2014. Національний стандарт України. Настанова з проектування залізобетонних балок. Розрахунок на вогнестійкість. Мінрегіон України. Київ. 2015.
7. ДСТУ-Н Б В.2.6-197:2014. Національний стандарт України. Настанова з проектування залізобетонних колон. Розрахунок на вогнестійкість. Мінрегіон України. Київ. 2015.

#### REFERENCES:

1. Rein G., Zhang Xun, Williams P., Hume B., Heise A., Jowsey A., Lane B., Torero J. Multi-story Fire Analysis for High-Rise Buildings. 11th Interflam, London. 2007. P. 605-616.
2. Fire Safety Design for Tall Buildings. Feng Fu. First edition published 2021 by CRC Press.
3. Nesterenko O.V., Lebedieva O.S., Chernyshenko H.O., Zaitseva V.H. Profilaktychni metody poperedzhennia pozhezh u zhytlovykh budynkakh pidvyshchenoi poverkhovosti. Naukovyi visnyk budivnytstva. 2019. T. 98. № 4. S. 298-305.
4. Khilko Yu. V., Tryhub V. V., Hrytsyna I. M. Modeliuvannia bezpechnoi evakuatsii liudei z vysotnykh budivel pry pozhezhi. Naukovyi visnyk budivnytstva. 2017. T. 90. №4. S. 267-271.
5. DSTU-N B EN 1992-1-2:2012. Eurocode 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist/ (EN 1992-1-2:2004, IDT).
6. DSTU-N B V.2.6-196:2014. Natsionalnyi standart Ukrainy. Nastanova z proektuvannia zalizobetonnykh balok. Rozrakhunok na vohnestiikist. Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2015.
7. DSTU-N B V.2.6-197:2014. Natsionalnyi standart Ukrainy. Nastanova z proektuvannia zalizobetonnykh kolon. Rozrakhunok na vohnestiikist. Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2015.

8. Левицкий В.Е. Диаграммный метод решения статической задачи расчета огнестойкости железобетонных конструкций: Дис. ... канд. Техн. наук: 05.23.01. М., 2006. 216 с.
9. Тихонов А.Н. Самарский А.А. Уравнения математической физики. Учебное пособие для вузов. 5-е изд. М.: Наука, 1977. 735 с.: ил.
10. Fib Bulletin No. 45. Practitioners' guide to finite element modelling of reinforced concrete structures. State-of-art report. 2008. 344 p.
11. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика: Учеб. для строит, спец вузов. 8-е изд. М.: Высш. шк. 1986. 607 с.: ил.
12. Снитко Н. К. Строительная механика: Учебник для вузов. 3-е изд. М.: Высш. школа, 1980. 431 с.
13. Оголихин Д.А. Метод конечных элементов. Коротко и без лишней теории. ЛитРес: Самиздат, 2018. 62 с.
14. Большаков В.И., Яценко Е.А., Соссу Г., Лемэр М., Рейнуар Ж.М., Кестенс Ж., Варзее Г., Кормо И. Основы метода конечных элементов. Днепропетровск: ПГАСиА, 2000. 255 с.
8. Levytskyi V.E. Dyahramnyi metod resheniya statycheskoi zadachy rascheta ohnestoikosty zhelezobetonnykh konstruktsyi: Dys. ... kand. Tekhn. nauk: 05.23.01. M., 2006. 216 s.
9. Tykhonov A.N. Samarskyi A.A. Uravneniya matematycheskoi fizyky. Uchebnoe posobyе dlia vuzov. 5-e yzd. M.: Nauka, 1977. 735 s.: yl.
10. Fib Bulletin No. 45. Practitioners' guide to finite element modelling of reinforced concrete structures. State-of-art report. 2008. 344 p.
11. Darkov A. V., Shaposhnykov N. N. Stroytelnaia mekhanyka: Ucheb, dlia stroyt, spets vuzov. 8-e yzd. M.: Vyssh. shk. 1986. 607 s.: yl.
12. Snytko N. K. Stroytelnaia mekhanyka: Uchebnyk dlia vuzov. 3-e izd. M.: Vyssh, shkola, 1980. 431 s.
13. Oholykhyn D.A. Metod konechnykh elementov. Korotko y bez lyshnei teoryy. LytRes: Samyzdat, 2018. 62 s.
14. Bolshakov V.Y., Yatsenko E.A., Sossu H., Lemэр M., Reinuar Zh.M., Kestens Zh., Varzee H., Kormo Y. Osnovy metoda konechnykh elementov. Dnepropetrovsk: PHASyA, 2000. 255 s.

**Fomin S.L., Butenko S.V., Plakhotnikova I.A., Koliesnikov S.M. THE BASIS FIRE RESISTANCE CALCULATION REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN STATIC AND DYNAMIC APPROACH.** The article considers the calculation of fire resistance as a dynamic task, which changes during time. The theoretical apparatus used for this type of problems is considered, theoretical calculations and equations for thermal and static calculations are given. The approach to calculation of fire resistance from positions of dynamics of a construction is formulated. The basic formulas of calculation are given.

**Key words:** calculation of fire resistance, structural mechanics, thermal calculation, static calculation, calculation in dynamic formulation.