

ФОРМУЛА ПОВНОЇ ДІАГРАМИ НАПРУЖЕННЯ-ДЕФОРМАЦІЯ ДЛЯ СТИСКУ БЕТОНУ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ ТА ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

¹**Бутенко С.В.**, к.т.н., доцент,
svbusan87@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6083-7668

¹**Плахотнікова І.А.**, к.т.н., доцент,
ira5657@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1986-4215

¹**Колесніков С.М.**, аспірант,
555ksn555@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2090-9647

¹*Харківський національний університет будівництва та архітектури*
вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна

Анотація. Теорія розрахунку залізобетонних конструкцій на вогнестійкість в цілому не є повністю розробленою. Серед методів розрахунку, викладених в нормах проектування й поділених на табличні дані, спрощені і уточнені методи відносно розвиненими є перша та друга група. А ось уточнені методи не описані зовсім, а мають тільки основні вимоги. Складність розробки уточнених методів розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій обумовлена: по-перше нелінійними міцнісними, деформаційними, теплофізичними та термомеханічними властивостями бетону і арматурної сталі та їх зміною з температурою; по-друге нелінійними температурними впливами, що спричинює пожежа і відповідно нелінійними нестационарними процесами теплообміну, що в результаті дає нелінійний розподіл теплових полів в об'ємі чи в перерізі елементу.

Однією з причин, що гальмує розвиток уточнених методів розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій, на думку авторів статті, є відсутність чіткого аналітичного опису (формули) повної (включаючи висхідну й низхідну гілки) діаграми «напруження-деформації» для бетону в умовах пожежі і при високих температурах. Такі формули були запропоновані багатьма авторами до цього, але така формула має відповідати вимогам, що були сформульовані й обґрунтовані в попередніх теоретичних дослідженнях.

Стаття присвячена отриманню формули повної діаграми «напруження-деформації» для стиску бетону, в умовах пожежі і при високих температурах. Отримання формули базується на знаннях, викладених в нормах проектування для нормальних температур і попередніх дослідженнях авторів статті, які й стають їх логічним продовженням. Виконана перевірка отриманої формули вимогам, сформульованим в попередніх дослідженнях і проведено порівняння з наявними експериментальними даними. Також отримані аналітичні залежності для температурних коефіцієнтів, виконано їх порівняння з даними, що містяться в нормах проектування.

Отримані результати можуть використовуватись як при розробці нових методів розрахунку вогнестійкості, що відносяться до уточнених, так і в існуючих, як альтернатива загальновідомим даним. Також можливе застосування в розрахункових комп'ютерних комплексах для опису деформації одновісного стиску бетону при різних температурах та при градієнті температур.

Ключові слова: діаграма «напруження-деформації», бетон, високі температури, пожежа.

Вступ. Сучасна будівельна наука володіє значним арсеналом методів щодо розрахунку залізобетонних конструкцій і їх елементів на вогнестійкість. В цьому питанні існує класифікація за табличними даними, спрощеними методами й уточненими [1]. Перші дві категорії розвинені досить широко й мають певні переваги, такі як: простота розрахунків,

зрозумілість, але мають свої обмеження у застосуванні, оскільки можуть використовуватись тільки для певних режимів пожежі, мають обмеженість в температурних діапазонах і наявність певної кількості припущень та спрощень.

Уточнені методи розрахунку більш складні в застосуванні, але не мають обмежень в режимах пожежі, позбавлені припущень і спрощень, їх використання може бути більш широким. Уточнені методи потребують розробки широкого і складного математичного апарату, що в майбутньому увійде в комп'ютерні програми з розрахунку залізобетонних конструкцій та їх елементів на вогнестійкість.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В нормах проектування [1-3] діаграма «напруження-деформації» для бетону в умовах пожежі і при високих температурах викладена двома частинами: висхідна гілка описана дрібно-ступеневою функцією, для низхідної гілки аналітичного опису не дано, а наведено тільки дозвіл на використання лінійних або нелінійних моделей.

В оглядовій статті американського вченого В Кодура [4] наведено різні аналітичні описи діаграми «напруження-деформації» для стиску бетону, як з норм проектування, так і автора. Але потрібно зазначити, що вони є кусковими функціями і кожна частина описує свій діапазон деформацій. Використання кускових функцій є незручним, а іноді й неможливим при розробці та розрахунках уточненими методами визначення вогнестійкості.

В роботі [5] також наведені формули для опису діаграми «напруження-деформації» для бетону як автора та і різних авторів, та виконано їх порівняння. Проаналізувавши викладене можна зауважити, що частина варіантів погано узгоджується з експериментами, частина є кусковими функціями, частина не включає в себе початковий модуль пружності бетону.

Мета та завдання. Метою дослідження є розробка формули повної діаграми «напруження-деформації» для бетону в умовах пожежі й при високих температурах, яка буде відповідати встановленим в попередній роботі [6] вимогам.

Матеріали і методика дослідження. Для виконання поставленої мети в даній роботі використовувались наступні методи дослідження: загально-логічні методи (аналіз, синтез, аналогія), математична формалізація.

Результати досліджень. В попередній роботі [7] було показано, що:

1. Температура не змінює характер нелінійності деформації бетону при одновісному стиску. Показано, що характер нелінійності деформації бетону залежить виключно від класу бетону.

2. Зв'язок між температурними коефіцієнтами січного модуля пружності бетону $K_{E\theta}$, максимального напруження стиску бетону $K_{f\theta}$ та деформації максимального напруження бетону $K_{\varepsilon\theta}$ реалізується простим співвідношенням:

$$\frac{K_{E\theta} \cdot K_{\varepsilon\theta}}{K_{f\theta}} = 1. \quad (1)$$

3. У формулі діаграми «напруження-деформації» для бетону при стиску:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}, \quad (2)$$

де

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}, \quad (3)$$

$$k = \frac{1.05 \cdot E_{cm} \cdot \varepsilon_{c1}}{f_{cm}}, \quad (4)$$

що наведена в нормах проектування залізобетонних конструкцій при нормальних температурах [8] величина k визначена як параметр, що характеризує пружно-пластичні властивості бетону, не залежить від температури, але залежить виключно від класу бетону:

$$k \neq f(\theta). \quad (5)$$

Отже, враховуючи вищенаведене, формулу (2) можна адаптувати для опису повної діаграми «напруження-деформації» стиску бетону, в умовах пожежі й при високих температурах:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}}}, \quad (6)$$

де $K_{f\theta}$ – температурний коефіцієнт максимального напруження стиску бетону;

$K_{\varepsilon\theta}$ – температурний коефіцієнт деформації максимального напруження бетону.

Враховуючи, що температурні коефіцієнти залежать виключно від температури та параметр k залежить від класу бетону, а клас бетону визначається максимальним напруженням стиску f_{cm} , то формулу (6) можна виразити так:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot F_1(\theta) \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)}} = f_{cm} \cdot F_1(\theta) \cdot \frac{F_k(f_{cm}) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)} \right)^2}{1 + (F_k(f_{cm}) - 2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot F_2(\theta)}}. \quad (7)$$

Потрібно зауважити, що формули (6) і (7) при $\theta = 20^\circ\text{C}$ перетворюються в формулу (1), що несприятливо іншим варіантам, викладеним в роботах [4, 5].

Ще однією властивістю запропонованої формули (6) та (7) є існування первісної по змінній ε_c :

$$\int f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}}} d\varepsilon_c =$$

$$= f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{(k-2) \cdot (\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} \cdot (k-1)^2 - \frac{k-2}{2} \varepsilon_c) \cdot \varepsilon_c - (\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} \cdot (k-1))^2 \cdot \ln((k-2)\varepsilon_c + \varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta})}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} \cdot (k-2)^3} \quad (8)$$

що необхідно при розрахунках вогнестійкості у відповідності з методикою, викладеній в роботі [9], коли інтеграл по площі перерізу є силою стиску бетону стиснутої зони балки.

Також доцільно отримати похідну від формули (6), фізичним змістом якої буде модуль пружності:

$$E_{c\theta} = \frac{d}{d\varepsilon_c} \left(f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \right)^2}{1 + (k-2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}}} \right) =$$

$$= f_{cm} \cdot K_{f\theta} \cdot \frac{((k-2)\varepsilon_c + k \cdot \varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}) \cdot (\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} - \varepsilon_c)}{(\varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta} + (k-2)\varepsilon_c)^2 \cdot \varepsilon_{c1} \cdot K_{\varepsilon\theta}} \quad (9)$$

Важливим критерієм отриманої формули (6) є порівняння з експериментальними даними. На рис. 1 виконано порівняння з експериментальними даними, що наведені в нормах проектування Великої Британії [10] та адаптованою формулою (6).

З графіка (рис. 1) видно, що запропонована формула (6) досить точно описує експериментальні діаграми «напруження-деформації» для бетону при одноосному стиску на висхідній гілці. На низхідній є розбіжність в сторону занижених значень, але це не є суттєвим недоліком оскільки при розрахунках будуть дещо нижчі значення. Також потрібно

зробити уточнення, що існує думка, що характер низхідної гілки діаграми «напруження-деформації» залежить від швидкості навантаження випробуваного зразка бетону [11] і, тому в різних джерелах [12] низхідна гілка може мати різну форму.

Наступне уточнення полягає в тому, що у позацинтрально стиснутих залізобетонних елементах будівель при невеликих значеннях ексцентриситету e , коли:

$$e < 0.1h, \quad (10)$$

де h – висота перерізу;

Величину граничної деформації бетону необхідно обмежувати деформацією максимального напруження бетону ε_{c10} [8]. У такому випадку низхідна гілка не бере участі у розрахунках зовсім.

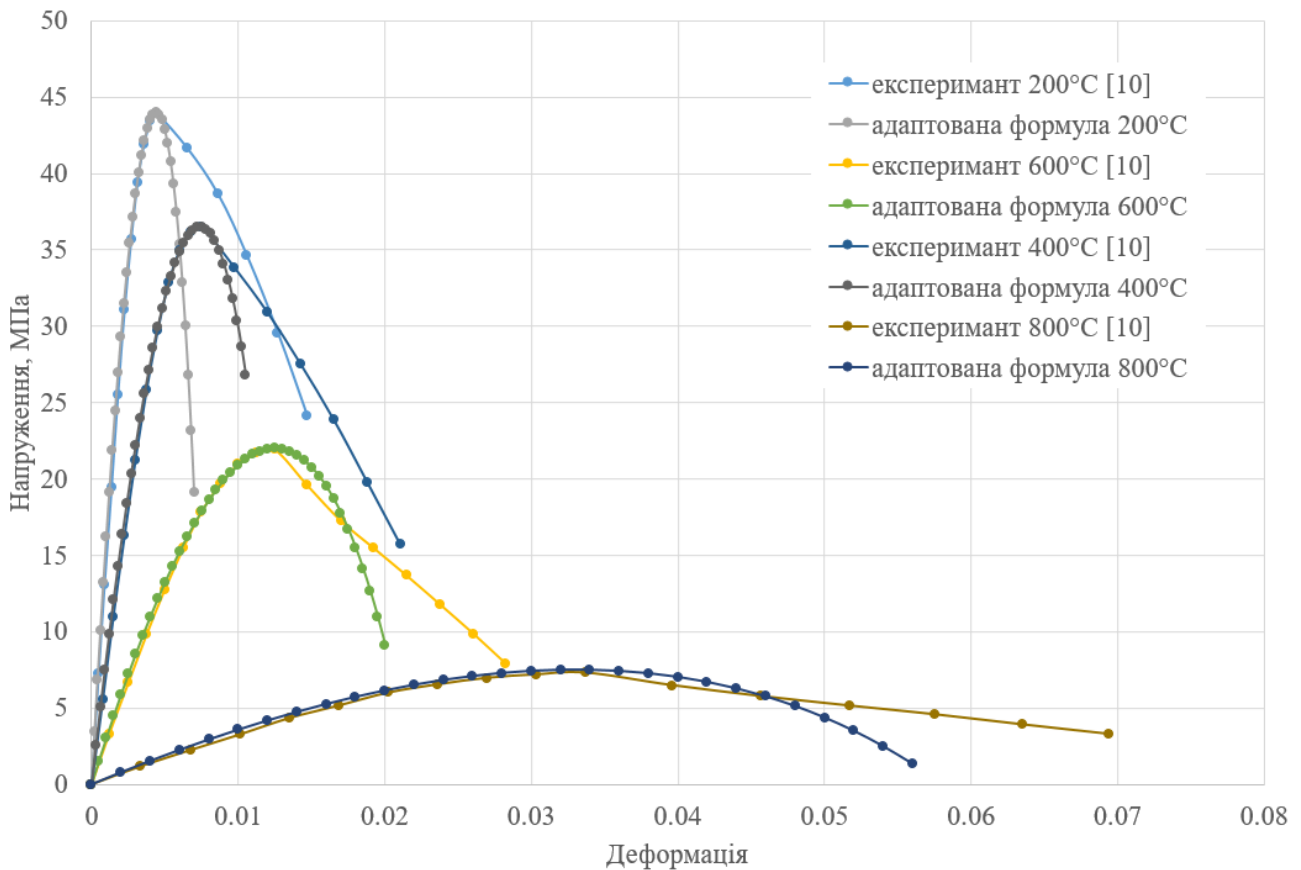


Рис. 1. Порівняння діаграм «напруження-деформації» для стиску бетону класу C32/40 (B40) при різних температурах

За допомогою формули (6) можливо описати напружено-деформований стан перерізу залізобетонного елемента, що має високу температуру (рис. 2, а), але однакову по всьому перерізу. Такий випадок в практиці майже не зустрічається. Хоча розрахунки спрощеними методами (метод 500°C, зональний метод) дещо подібні до цього, коли на кінцевому етапі розрахунку частина перерізу без зміни температури.

Але, при розрахунках вогнестійкості в перерізі елемента, маємо нестационарне температурне поле, що описується експонентною функцією (рис. 2, б). Також при розрахунках конструкцій, що працюють під впливом технологічних температур (наприклад коксові батареї) маємо в перерізі стаціонарне температурне поле, що буде описуватись лінійними функціями (рис. 2, в).

В останніх двох випадках маємо плавну зміну властивостей матеріалу (бетону) по площині перерізу в одному або двох напрямках, викликаних дією температури. Тобто будуть змінюватись модуль пружності, максимальне напруження стиску, деформація при

максимальному напруженні. У формулі (7) це виражено через функції $F_1(\theta)$, $F_2(\theta)$. Ці функції в числовому вигляді і дискретно з кроком 100 °С виражені в нормах проектування в таблиці 3.1 [1] для бетонів на силікатному та карбонатному заповнювачах. Але для розрахунків необхідний їх аналітичний вигляд у вигляді неперервної, не кускової функції.

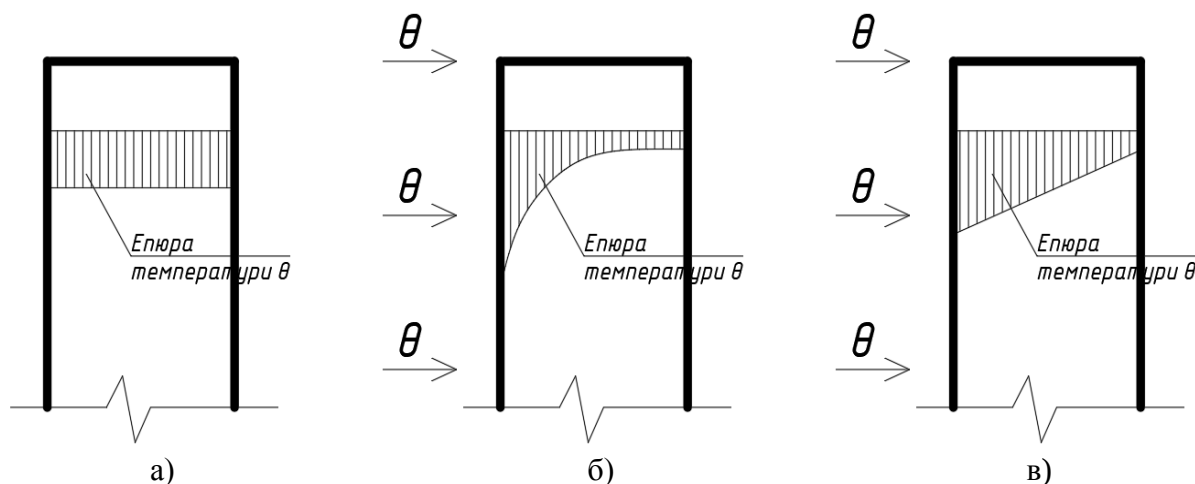


Рис. 2. Варіанти розподілу температур в перерізі залізобетонного елементу (показано у плоскій формі):

а – підвищена температура; б – дія пожежі, розрахунки на вогнестійкість; в – технологічні температури

На даному етапі досліджень є можливим запропонувати наступні залежності для опису функції $F_1(\theta)$, $F_2(\theta)$ на силікатному заповнювачі:

$$F_1(\theta) = \frac{f_{cm\theta}}{f_{cm}} = 2 \cdot 10^{-9} \cdot \theta^3 - 3.43 \cdot 10^{-7} \cdot \theta^2 + 4.12 \cdot 10^{-4} \cdot \theta + 0.99, \quad (11)$$

$$F_2(\theta) = \frac{\varepsilon_{cl\theta}}{\varepsilon_{cl}} = \frac{2.58 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^3 - 2.16 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^2 + 3.15 \cdot 10^{-3} \cdot \theta + 0.87}{1.86 \cdot 10^{-12} \cdot \theta^4 - 3.83 \cdot 10^{-9} \cdot \theta^3 + 5.93 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2 - 4.15 \cdot 10^{-3} \cdot \theta + 1}. \quad (12)$$

Далі наведено графіки для порівняння значень функцій у формулах (11) (рис. 3) та (12) (рис. 4) з даними, що містяться в нормах проектування [1]. Потрібно відмітити, що в роботі [5] запропоновані різні аналітичні значення для деформації максимальної міцності бетону $\varepsilon_{cl\theta}$, але вони не задовольняють вимогам, наведеним вище.

Наведені формули (11, 12) добре узгоджуються з даними норм проектування [1], хоча є несуттєві розбіжності на деяких ділянках.

Висновки. На підставі попередніх досліджень виконана адаптація формули, що описує повну діаграму «напруження-деформації» стиску бетону в нормальних умовах, для використання в умовах пожежі й при високих температурах. Отримана формула включає всі основні характеристики бетону, такі як модуль пружності, максимальне напруження стиску, деформація при максимальному напруженні, описує як висхідну, так і низхідну гілки діаграми «напруження-деформації» при одновісному стиску. Адаптована формула є нелінійною, не кусковою функцією, має первісну й похідну, що значно полегшує її використання при розрахунках.

Адаптована формула добре узгоджується з експериментальними даними, наведеними в різних джерелах. Також при введенні функцій (поліном, дрібно-степеневі) температурних коефіцієнтів може використовуватись при розрахунках на вогнестійкість і для опису напруженого-деформованого стану перерізу залізобетонного елементу, що має нелінійну зміну температур, викликану впливом пожежі.

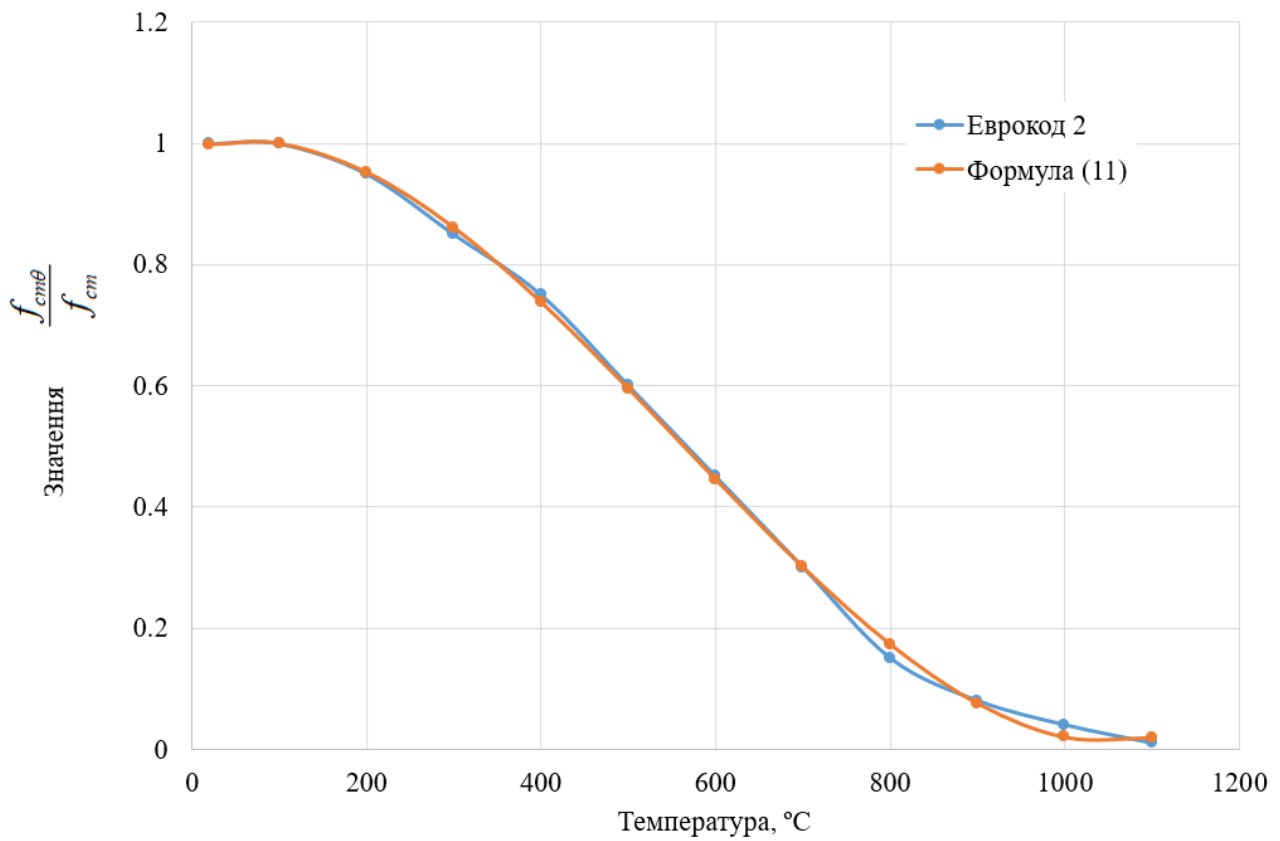


Рис. 3. Порівняння зміни з температурою коефіцієнта максимальної міцності бетону за формулою (11) з даними норм проектування [1]

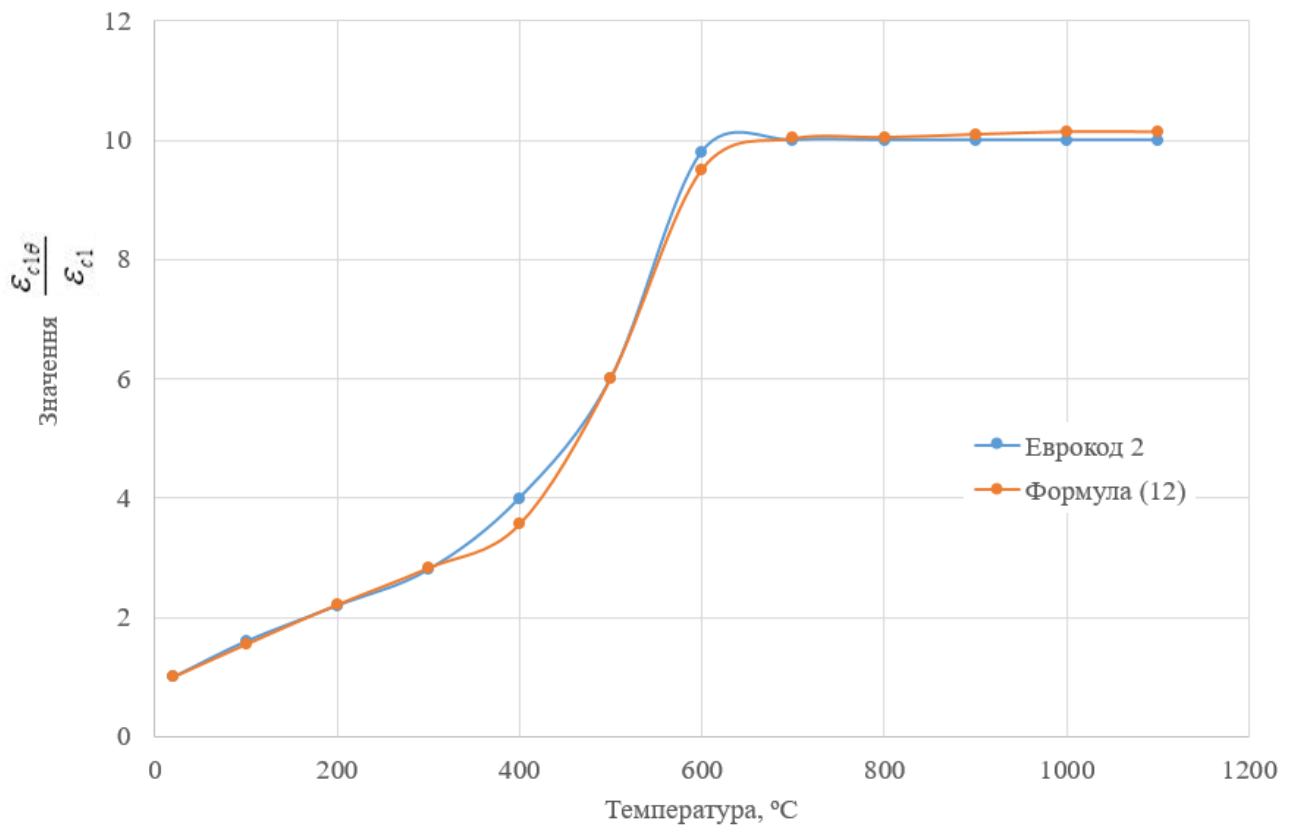


Рис. 4. Порівняння зміни з температурою коефіцієнта деформації максимальної міцності бетону за формулою (12) з даними норм проектування [1]

Література

1. 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). Мінрегіон України. Київ. 2012.
2. ДСТУ-Н Б В.2.6-196:2014. Національний стандарт України. Настанова з проектування залізобетонних балок. Розрахунок на вогнестійкість. Мінрегіон України. Київ. 2015.
3. ДСТУ-Н Б В.2.6-197:2014. Національний стандарт України. Настанова з проектування залізобетонних колон. Розрахунок на вогнестійкість. Мінрегіон України. Київ. 2015.
4. Kodur, Venkatesh. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. ISRN Civil Engineering. 2014. 1-15. 10.1155/2014/468510.
5. Bastami, Morteza & Aslani, F. & Omran, M. High-Temperature Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Civil Engineering*. 2010. 8. pp. 337-351.
6. Fomin S.L., Bondarenko Y.V., Butenko S.V. and Koliesnikov S.M. Scientific approach to fire resistance calculation of reinforced concrete beams and columns. *Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020)*. Vol. 1021, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012013>.
7. Колесніков С.М. Визначення теоретичних залежностей між температурними коефіцієнтами для бетону, що працює в умовах пожежі та при високих температурах. *«Науковий вісник будівництва»*. 2021. т. 105. №3. С. 75-81. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-75-81.
8. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1992-1-1:2004, IDT). Мінрегіон України. Київ. 2010.
9. Колесніков С.М. Нелінійна методика розрахунку вогнестійкості стрижневого залізобетонного елементу (балка) на дію згинального моменту через розрахунок максимальної несучої здатності його нормального перерізу на визначений момент часу при будь яких температурних впливах. *«Науковий вісник будівництва»*. 2021. т. 106. №4. С.107-115. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-106-4-107-115.
10. DD ENV 1992-1-2:1996. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2 General rules – Structural fire design – (together with United Kingdom National Application Document). Мінрегіон України. Київ. 1996.
11. Довженко О.А., Погребной В.В. Гармонизация диаграммы деформирования бетона при сжатии для применения в расчетах железобетонных элементов на основе европейских норм. Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов): материалы Международной научно-технической конференции. Минск : БНТУ, 2017. С. 56-65.
12. Fib Bulletin No. 38 Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling. State-of-art report (106 pages, ISBN 978-2-88394-078-9, April 2007 doi.org/10.35789/fib.BULL.0038).

References

- [1] DSTU-N B EN 1992-1-2:2012. Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist (EN 1992-1-2:2004, IDT). Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2012.
- [2] DSTU-N B V.2.6-196:2014. Natsionalnyi standart Ukrainy. Nastanova z proektuvannia zalizobetonnykh balok. Rozrakhunok na vohnestiikist. Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2015.
- [3] DSTU-N B V.2.6-197:2014. Natsionalnyi standart Ukrainy. Nastanova z proektuvannia zalizobetonnykh kolon. Rozrakhunok na vohnestiikist. Minrehion Ukrainy. Kyiv. 2015.
- [4] Kodur, Venkatesh, "Properties of Concrete at Elevated Temperatures", *ISRN Civil Engineering*, pp. 1-15, 2014.10.1155/2014/468510.
- [5] Bastami Morteza, F. Aslani, M. Omran, "High-Temperature Mechanical Properties of Concrete", *International Journal of Civil Engineering*, no. 8, pp. 337-351, 2010.
- [6] S.L. Fomin, Y.V. Bondarenko, S.V. Butenko and S.M. Koliesnikov, "Scientific approach to fire resistance calculation of reinforced concrete beams and columns", *Materials Science and Engineering, International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020)*, vol. 1021, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012013>.
- [7] S.M. Koliesnikov, "Vyznachennia teoretychnykh zalezhnosti mizh temperaturnymy koefitsientamy dlia betonu, shcho pratsiuie v umovakh pozhezhi ta pry vysokykh temperaturakh", *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»*, T. 105, no. 3, pp. 75-81, 2021. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-75-81.
- [8] DSTU-N B EN 1992-1-1:2010. Yevrokod 2. Proektuvannia zalizobetonnykh konstrukttsii. Chastyna 1-1. Zahalni pravyla i pravyla dlia sporud (EN 1992-1-1:2004, IDT).
- [9] S.M. Koliesnikov, "Neliniina metodyka rozrakhunku vohnestiikosti stryzhnevoho zalizobetonnoho elementu (balka) na diiu zghynalnoho momentu cherez rozrakhunok maksimalnoi nesuchoi zdutnosti yoho normalnoho pererizu na vyznachenyi moment chasu pry bud yakyykh temperaturnykh vplyvakh", *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»*, T. 106, no. 4, pp. 107-115, 2021. doi.org/10.29295/2311-7257-2021-106-4-107-115.
- [10] DD ENV 1992-1-2:1996. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2 General rules – Structural fire design – (together with United Kingdom National Application Document).
- [11] O.A. Dovzhenko, V.V. Pohrebnoi, "Harmonyzatsiya dyahrammy deformyrovaniya betona pry szhatyy dlia pryimeneniya v raschetakh zhelezobetonnykh elementov na osnove evropeyskykh norm", *Materyaly Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnycheskoi konferentsyy*. Mynsk: BNTU, 2017, pp. 56-65.
- [12] Fib Bulletin No. 38. Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling. State-of-art report, 2007. doi.org/10.35789/fib.BULL.0038.

THE FORMULA FOR THE COMPLETE STRESS-STRAIN DIAGRAM FOR COMPRESSIVE CONCRETE UNDER FIRE AND HIGH TEMPERATURE CONDITIONS

¹**Butenko S.V.**, Ph.D., Associate Professor,
svbusan87@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6083-7668

¹**Plahotnikova I.A.**, Ph.D., Associate Professor,
ira5657@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1986-4215

¹**Kolesnikov S.M.**, graduate student,
555ksn555@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2090-9647

¹*Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture*
St. Sumska, 40, Kharkiv, 61002, Ukraine

Abstract. The theory of calculating reinforced concrete structures for fire resistance in general is not fully developed. Among the calculation methods outlined in the design standards and divided into tabular data, simple and advanced methods are relatively developed in the first and second groups. But the advanced methods are not described at all, but have only basic requirements. The problems of developing advanced methods for calculating the fire resistance of reinforced concrete structures is due to: firstly, nonlinear strength, deformation, thermophysical and thermomechanical properties of concrete and reinforcing steel and their change with temperature; secondly, by non-linear temperature effects caused by a fire and, accordingly, by non-linear non-stationary processes of heat exchange, which as a result gives a non-linear distribution of heat fields in the volume or cross-section of the element.

One of the reasons that inhibits the development of refined methods for calculating the fire resistance of reinforced concrete structures, according to the authors of the current article, is the lack of a clear analytical description (formula) of the complete (including ascending and descending branches) stress-strain diagram for concrete, in fire conditions and at high temperatures. Such a formula must meet the requirements formulated and substantiated in previous theoretical studies.

The article is devoted to obtaining the formula for the complete stress-strain diagram for concrete compression, under fire conditions and at high temperatures. Obtaining the formula is based on the knowledge set forth in the design standards at normal temperatures and the authors' previous research, which becomes their logical continuation. The received formula was verified against the requirements formulated in previous studies and compared with experimental data. Analytical dependences for temperature coefficients were also obtained, and their comparison with the data contained in the design standards was performed.

The obtained results can be used both in the development of new fire resistance calculation methods, related to the refined ones, and in the existing ones, as an alternative to the generally known data. It is also possible to use it in calculation computer programs to describe the deformation of uniaxial compression of concrete at different temperatures and with a temperature gradient.

Key words: stress-strain diagram, concrete, high temperatures, fire.

Стаття надійшла до редакції 8.08.2022