

УДК 624.012

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО СХОДОВОГО МАРШУ В УМОВАХ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.143-152>

Несен І. О.*, ORCID iD 0000-0001-5847-4805

*E-mail: Nesen-ua@ukr.net

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету служби цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 08.11.2022

Пройшла рецензування:

16.11.2022

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

залізобетонний сходовий марш, вогнестійкість, несуча здатність, метод кінцевих елементів

АНОТАЦІЯ

Проаналізовано математичні моделі, що описують теплопровідність та напружено-деформований стан залізобетонних ходових маршів у разі впливу стандартного температурного режиму пожежі. З метою проведення дослідження поведінки залізобетонних сходових маршів під час пожежі сформульовано основні положення та припущення для здійснення розрахунку параметрів поширення тепла та напружено-деформованого стану, які мають місце у залізобетонних сходових маршах за таких умов. На основі сформульованих положень та припущень обгрунтовано відповідні математичні моделі, які базуються на застосуванні метода кінцевих елементів у нелінійній постановці, та проведено на їх основі числовий експеримент щодо виявлення особливостей розподілення температури, деформування та руйнування залізобетонного сходового маршу під впливом стандартного температурного режиму пожежі. Згідно з отриманими даними проаналізовано закономірності залежності меж вогнестійкості залізобетонного сходового маршу від його конструктивних параметрів.

Постановка проблеми.

У сучасних умовах використовуються два основних підходи до оцінки вогнестійкості несучих будівельних конструкцій, у тому числі залізобетонних сходових маршів. Згідно із першим підходом для оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів використовуються вогневі випробування, які проводяться у разі використання зразків із відповідними реальними розмірами і навантаженнями [1–2]. На сьогодні цей підхід має перевагу у разі встановлення відповідності вогнестійкості залізобетонних сходових маршів та інших будівельних конструкцій з огляду на те, що він є наочним і дає змогу проконтролювати прямі критерії настання граничних станів втрати вогнестійкості. Недоліками такого підходу вважається високий рівень матеріальних та трудових затрат на його реалізацію.

Для реалізації другого підходу з метою оцінювання вогнестійкості використовуються розрахункові методи [3–6]. Такий підхід останнім часом отримав істотний розвиток. Водночас результати обчислень за цими методами є достовірними і вичерпними, за якими можна однозначно встановити значення меж вогнестійкості залізобетонних сходових маршів та інших елементів будівельних конструкцій без обмежень на конструктивні особливості, габаритні розміри та різні поєднання початкових і граничних умов під час постановки задач. Розрахункові методи розрахункової оцінки вогнестійкості мають ієрархічну структуру, що ранжує зазначені методи за складністю за початковими припущеннями і базовими математичними моделями. На найнижчих щаблях цієї структури перебувають спрощені методи, які засновані на використанні довідникових таблиць або номограм, що містять

конструктивні характеристики елементів вказаних будівельних конструкцій для встановлення їх відповідності необхідному класу вогнестійкості. До переваг такого підходу належать висока продуктивність, гнучкість, що дає можливість здійснити доступний інженерний аналіз вогнестійкості конструкцій. Ієрархічна структура методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів нині є неповною, оскільки для них відповідні табличні дані є обмеженими. Такі дані можливо одержати у разі проведення великого обсягу стандартних вогневих випробувань. Проте, зважаючи на суттєву трудомісткість вогневих випробувань, для одержання таких табличних довідникових даних перспективним є використання методів математичного моделювання поведінки сходових маршів в умовах пожежі із використанням методу кінцевих елементів.

З огляду на викладене вище, можна зазначити, що розкриття закономірностей залежності межі вогнестійкості залізобетонних сходових маршів від їх конструктивних параметрів під тепловим впливом стандартного температурного режиму пожежі як підґрунтя для удосконалення ієрархічної системи розрахункових методів оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів на основі створення довідникових таблиць та номограм є актуальною науково-технічною задачею, що сприятиме істотному підвищенню ефективності такого підходу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [5–6] добре визначені всі основні аспекти методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів. Ці методи зараз широко застосовуються та набули суттєвого розвитку. Це пов'язано із прогресом обчислювальних алгоритмів, що дають змогу враховувати всі значущі процеси та особливості залізобетонних сходових маршів, що мають місце у разі їх нагрівання під час пожежі і засновані на використанні методів. У роботах [5–6] наведено основні аспекти під час реалізації

зазначеного підходу, на якому засновані уточнені методи розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Проте для залізобетонних сходових маршів такий підхід розвинений недостатньо. У роботах [4; 7] наведено основні розрахункові методики, в яких використовується інженерний підхід, заснований на спрощених математичних моделях опору матеріалів. Такий підхід є основою для спрощених методів. Також слід зазначити, що вказані методи для залізобетонних сходових маршів розвинуті недостатньо. Разом обидва типи методів для розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій складають ієрархічну систему методів, що реалізується у настанові [4]. Зазначена система охоплює всі типи конструкцій, проте залізобетонні сходові марші як окремий тип конструкцій не охоплені нею. Водночас припускається, що методи, рекомендовані для інших типів будівельних конструкцій (наприклад залізобетонних плит перекриттів), можуть використовуватись для цього. Такий стан зумовлює певну неоднозначність. З огляду на це система ієрархічних методів розрахункової оцінки залізобетонних конструкцій потребує удосконалення з урахуванням викладеного вище.

Спрощені розрахункові методи ієрархічної системи оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів, засновані на табличних довідникових даних або спеціальних номограмах, обґрунтовуються через проведення комплексу вогневих випробувань. Проте в роботі [6] показано, що перспективною альтернативою для цього є математичне моделювання із залученням методу кінцевих, яке своєю чергою є основою для уточнених розрахункових методів [5–6], що входять також як компонент у ієрархічну систему, описану в настанові [4]. Таким чином, розвиток методів розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних сходових маршів є актуальною науковою задачею. З огляду на це і поставлена мета дослідження.

Мета дослідження полягає у дослідженні закономірностей залежності межі вогнестійкості залізобетонних маршів від їх конструктивних параметрів в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі із використанням загального теоретичного підходу на основі методу кінцевих елементів.

Об'єкт дослідження – термомеханічні процеси, що відбуваються у залізобетонних сходових маршах в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – закономірності зміни значення межі вогнестійкості залізобетонних сходових маршів від їх конструктивних характеристик в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Методи дослідження. Під час реалізації досліджень для досягнення поставленої мети був застосований комплекс дослідницьких методів, що включає: математичне моделювання на основі методу кінцевих елементів, метод аналізу, метод синтезу та метод порівняння.

Виклад основного матеріалу. Згідно із основними рекомендаціями щодо проведення розрахунку залізобетонних

конструкцій на вогнестійкість, наданими у роботі [3], була запропонована до розгляду конструкція залізобетонного маршу 1 ЛМ 30.12.15-4л серії 1.151.1-7. Зазначений залізобетонний марш вибрано, оскільки він несе найбільше навантаження і є таким, що має один із найбільших прольотів серед інших сходових маршів. За таких умов було визначено основні конструктивні особливості для моделювання, що надані нижче.

1. Збірний марш має внутрішнє армування.

2. Збірний марш має геометричну форму, в якій не враховані несуттєві геометричні особливості.

3. Основні конструктивні параметри мають відповідати рекомендаціям серії 1.151.1-7.

4. Закріплення залізобетонного сходового маршу з обох кінців є шарнірним відповідно до схеми (рис. 1).

5. Навантаження на сходи відповідає вимогам та може бути прийнято як 0,5 від загальної несучої здатності за врахування середнього коефіцієнта запасу.

На рис. 1. наведена відповідна конструктивна схема сходового маршу, а на рис. 2 – схема вогневого впливу та механічного навантаження.

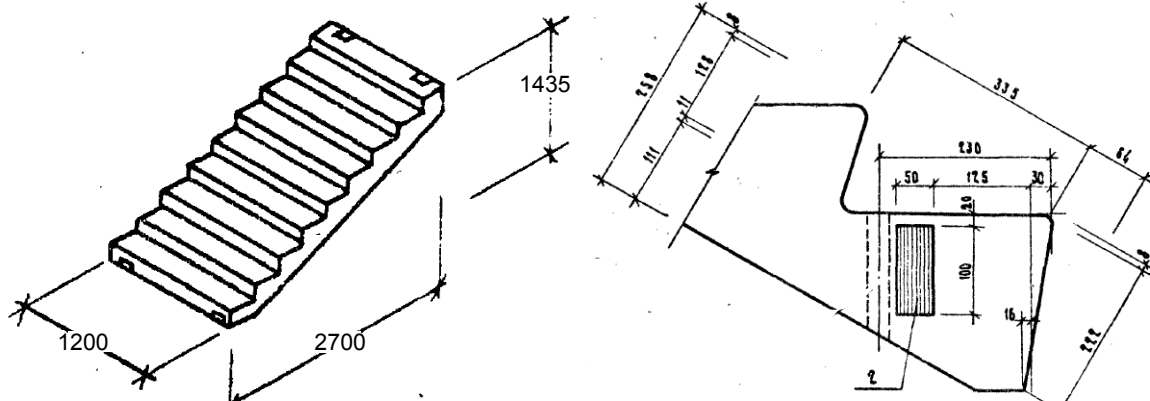


Рисунок 1 – Конструктивна схема залізобетонного сходового маршу

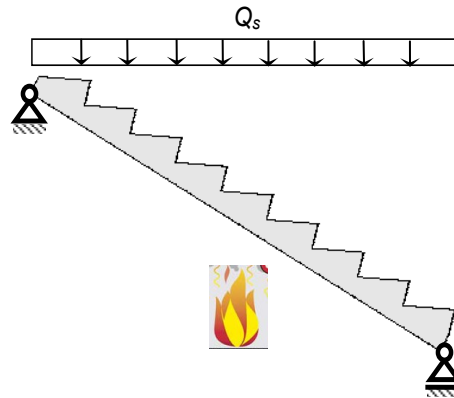


Рисунок 2 – Розрахункова схема залізобетонного сходового маршу

Конструктивні характеристики досліджуваного залізобетонного сходового маршу надані у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри залізобетонного сходового маршу

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 20/25	
Густина бетону	ρ_B	2300	кг/м ³
Гранична вологість	u	< 3	%
Робоча арматура нижня: • діаметр	d_1	Клас А400С 0,006	м
Робоча арматура верхня: • діаметр	d_2	Клас А400С 0,006	м

Для математичного моделювання поведінки залізобетонного сходового маршу в умовах пожежі були визначені найбільш ефективні підходи до розв'язання задач такого типу [4–6]. Проведений аналіз дав змогу прийняти основні положення й припущення, що дають змогу провести розрахунок і узгоджуються із рекомендаціями, наведеними у роботах [4; 6].

Під час проведення розрахунків був прийнятий комплекс початкових даних, який включає характеристики бетону та арматурної сталі, числові величини параметрів граничних умов, до постановки теплової задачі та задачі розрахунку несучої здатності. На рис. 3 надані температурні криві теплофізичних

характеристик бетону, рекомендовані у настанові [4] щодо розрахунку залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Ці характеристики визначають бетон як однорідний та ізотропний матеріал, що є прийнятним припущенням під час розв'язування такого типу задач [4–5].

На рис. 4 наведені дані щодо механічних та термомеханічних характеристик бетону, які були взяті для розрахунку згідно із рекомендаціями, наведеними у настанові [4]. Зазначені характеристики являють собою діаграми деформування бетону за різних температур його нагрівання, а також його закон температурної деформації залежно від його температури нагріву.

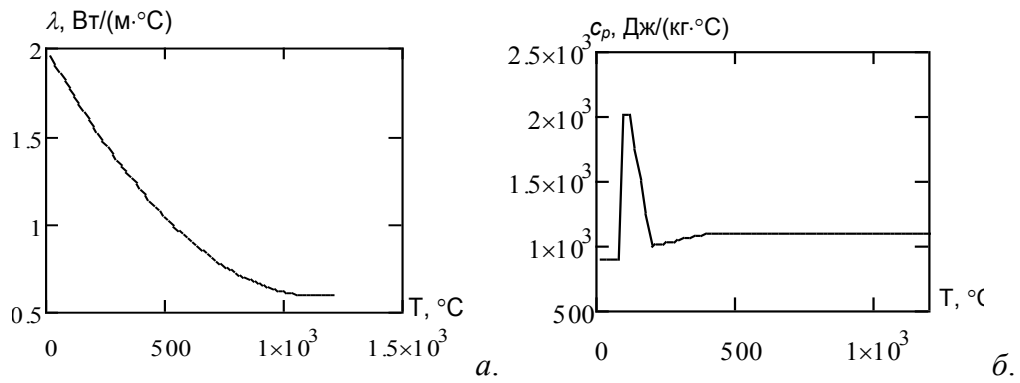


Рисунок 3 – Теплофізичні характеристики важкого бетону: коефіцієнт теплопровідності (а); питома теплоємність (б)

Аналогічні дані щодо механічних та термомеханічних характеристик арматурної сталі наведені на рис. 4 відповідно до рекомендацій настанови [4].

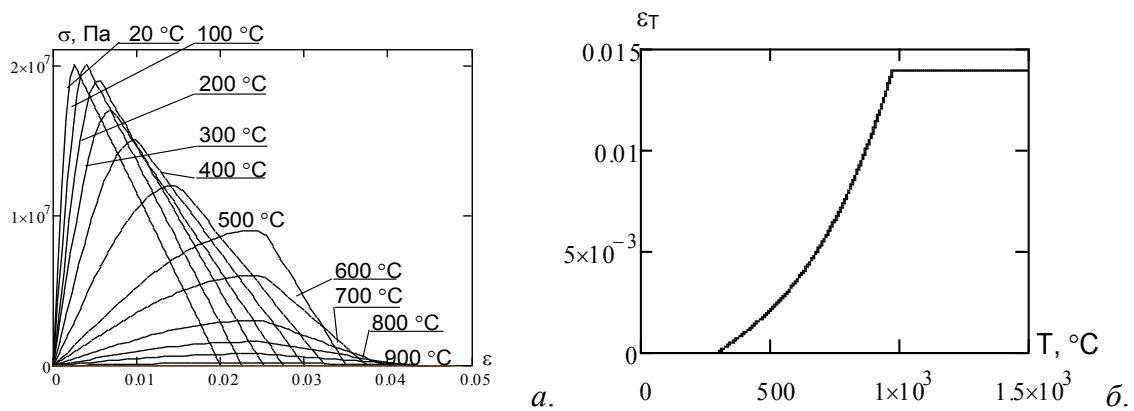


Рисунок 3 – Термомеханічні характеристики бетону: діаграми деформування (а), температурні деформації (б)

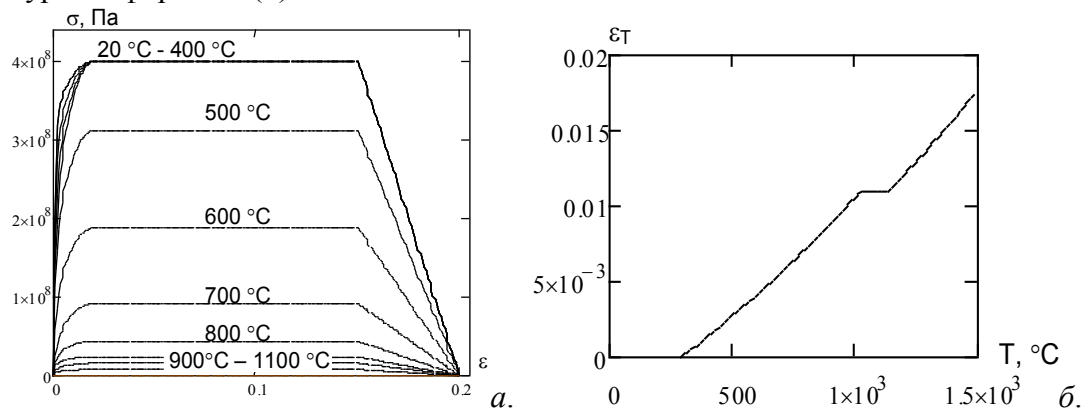


Рисунок 4 – Термомеханічні характеристики арматурної сталі А500С: діаграми деформування (а); температурні деформації (б)

Під час здійснення розрахунку застосовані математичні моделі, аспекти яких наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Дані щодо основних математичних моделей для здійснення розрахунків для числового дослідження поведінки залізобетонних сходових маршів в умовах пожежі

Особливість поведінки матеріалу стіни	Використана математична модель (метод)	Джерело
Теплотехнічна задача		
Теплопровідність	Рівняння нестационарної теплопровідності з апроксимацією за МКЕ	[5–6]
Граничні умови	III роду	[5–6]
Фізична нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[5–6]
Статична задача		
НДС	МКЕ	[5–6]
Пластичне деформування	Асоціативна теорія пластичного деформування Бесселінга	[5–6]
Тріщиноутворення	Складений критерій міцності бетону Віллема і Варнке	[5–6]
Нелінійність	Ітеративний метод Ньютона-Рафсона	[5–6]

Для завдання граничних умов були використані параметри згідно з чинними стандартами України щодо розрахунку будівельних конструкцій на вогнестійкість. Величини вибраних параметрів наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри граничних умов

Характеристика	Одиниці виміру	Величина	Джерело
Параметри граничних умов теплотехнічної задачі			
Номінальний тепловий вплив		Стандартний температурний режим пожежі	
Коефіцієнт теплообміну конвекцією на обігрівній поверхні	$Вт/(м^2 \cdot К)$	25	[4]
Коефіцієнт теплообміну конвекцією на необігрівній поверхні	$Вт/(м^2 \cdot К)$	6	[4]
Ступінь чорноти бетону	-	0.7	[4]
Стала Стефана-Больцмана	$Вт/(м^2 \cdot К^4)$	$5.67 \cdot 10^{-8}$	[6]
Параметри граничних умов статичної задачі			
Коефіцієнт Пуасона	-	0,2	[4]

Під час здійснення розрахунку побудовано кінцево-елементні схеми залізобетонного сходового маршу, які зображені на рис. 5.

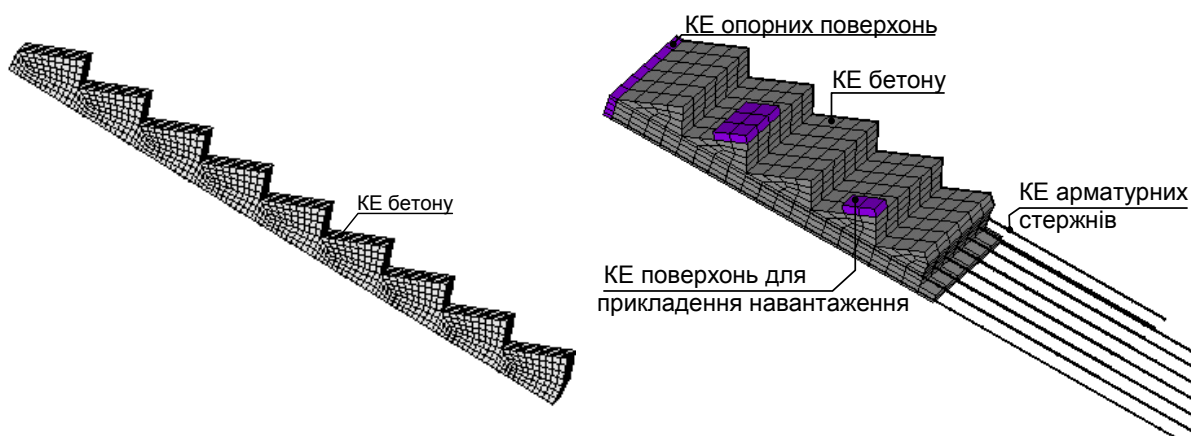


Рисунок 5 – Кінцево-елементні схеми: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б)

Під час будівництва кінцево-елементних схем залізобетонного сходового маршу було прийнято, що сітка кінцевих елементів для розв'язання

теплотехнічної задачі має бути густішою. Сітка для задачі міцності має бути більш розрідженою. Для прикладання температурних показників у вузлові точки кінцево-елементної схеми структурної задачі була застосована лінійна інтерполяція.

Для зменшення обсягу розрахунків розглянуто симетричну половину плити під час розв'язування задачі міцності. Робота досліджуваних фрагментів у складі

всього залізобетонного сходового маршу враховується під час накладання граничних умов симетрії на бокову площину симетрії у задачі міцності. Такі умови встановлюються через прикладання відповідних односторонніх механічних в'язів.

Згідно із розв'язком теплотехнічної задачі обчислені температурні показники у залізобетонному сходовому марші, які надані як температурні криві на рис. 6.

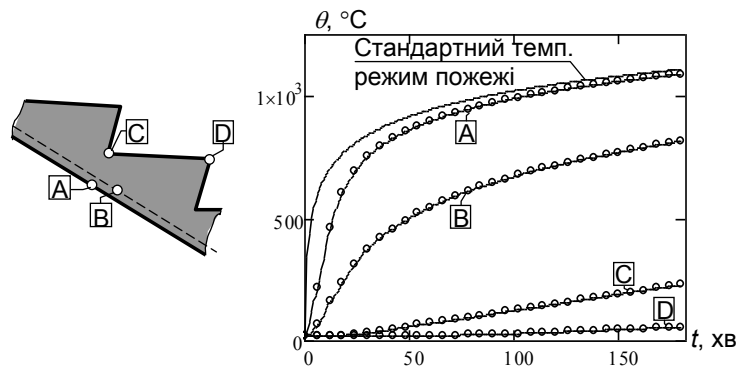


Рисунок 6 – Температурні показники нагріву у різних точках перерізу залізобетонного сходового маршу під впливом стандартного температурного режиму пожежі залежно від часу

За результатом розв'язку задачі міцності побудовано криві максимального прогину залізобетонного сходового маршу залежності від часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. Побудовані криві максимального прогину наведені на рис. 7.

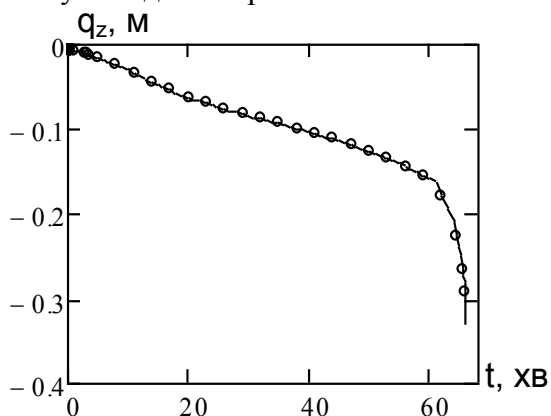


Рисунок 7 – Графік максимального прогину сталезалізобетонної плити (а) та його швидкості наростання (б) залежно від часу випробування

Перша ділянка кривої відповідає початковому навантаженню залізобетонного сходового маршу. Це ділянка із вертикальним стрибком на

початку графіка. Наступна ділянка до 60 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі має помірне збільшення прогину, коли нагрів не супроводжується істотними деформаціями. Після 60 хв теплового впливу прогин інтенсивно наростає і спостерігається швидка деструкція залізобетонного сходового маршу.

Отриманий графік дає змогу зафіксувати настання граничного стану втрати несучої здатності за поточним значенням прогину у разі його порівняння із гранично допустимими, що обчислюється за формулою:

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} = 164 \text{ мм.} \quad (1)$$

де L – довжина прольоту сходового маршу, мм, а b – висота суцільної частини маршу, мм.

Використовуючи такий підхід і варіюючи навантаження отримано набір кривих, були порівняні із критичним значенням прогину. Результати наведені на рис. 8.

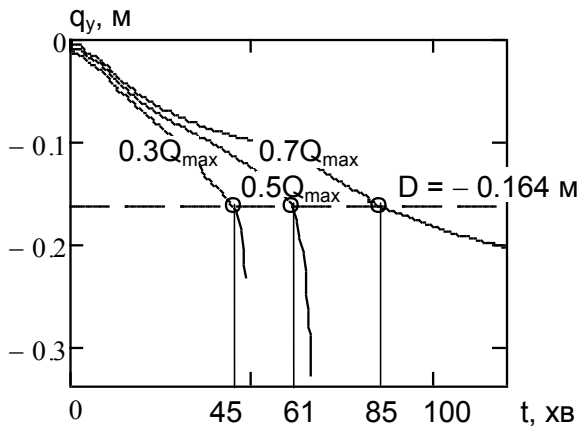


Рисунок 8 – Графіки максимального прогину залізобетонного сходового маршу залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі для різних умов навантаження

За отриманими результатами обчислень щодо оцінки вогнестійкості залізобетонного сходового маршу було побудовано криву залежності його межі вогнестійкості від рівня навантаження, що наведена на рис. 9.

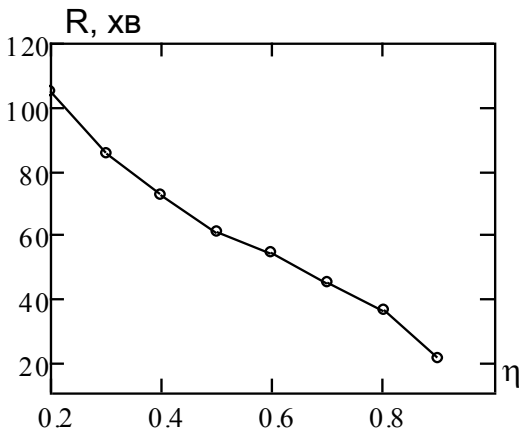


Рисунок 9 – Залежність межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу від рівня його механічного навантаження

Висновки та напрями подальших досліджень. З огляду на результати досліджень можна сформулювати такі висновки:

1. Обґрунтовано математичні моделі для обчислення температурних показників та параметрів напружено-деформованого стану для залізобетонного сходового маршу в умовах

теплого впливу стандартного температурного режиму пожежі.

2. Визначено межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу за несучою здатністю за різних рівнів механічного навантаження протягом часу впливу стандартного температурного режиму пожежі в інтервалі від 0 до 120 хв.

3. Найбільша межа вогнестійкості за несучою здатністю для залізобетонного сходового маршу із рівнем механічного навантаження $0,2Q_{max}$ склала 105 хв, а найменша – 21 хв для рівня навантаження $0,9Q_{max}$.

4. Під час оцінювання межі вогнестійкості залізобетонного сходового маршу вивчено температурні розподіли у його внутрішніх шарах під час його нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі та виявлено, що межа вогнестійкості

з настанням граничного стану втрати теплоізолювальної здатності складала 111 хв.

5. Під час вивчення напружено-деформованого стану залізобетонного сходового маршу в умовах механічного навантаження та теплового впливу пожежі обчислено його параметри, внаслідок чого виявлено, що залежність межі вогнестійкості за несучої здатності від рівня механічного навантаження є наближеною до лінійного.

6. Досліджено сценарій руйнування залізобетонного сходового маршу в умовах пожежі, що вбачає причину його руйнування під час нагрівання у руйнуванні шару бетону поблизу арматурних стрижнів та утворенні локальної зони деформації у зазначеній області.

7. Розроблені алгоритми обчислення параметрів напружено-деформованого стану залізобетонного сходового маршу можуть бути використані у комплексних чисельних дослідженнях для оцінки меж вогнестійкості таких сходових маршів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги : ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний з 01.06.2017]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. 35 с.
2. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека (ISO 834 : 1975) : ДСТУ Б В.1.1-4-98*. [Чинний від 28.10.1998]. К. : Укрархбудінформ, 2005. 20 с.
3. Actions on structures – Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2 : General rules – Structural fire design EN 1991-1-2 : 2002 Eurocode 1. Brussels. 2002.
4. Design of concrete structures Part 1-2 : General rules – Structural fire design EN 1992-1-2 : 2005 Eurocode 2. Brussels. 2004.
5. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings. NIST Technical Note 1681. 2010. 217 p.
6. Поздєєв С. В., Левченко А. Д. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. *Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. 2011. № 697. С. 264–269.
7. Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. pp. 107–116.

REFERENCES

1. *Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy* [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). DBN V.1.1-7:2016 from 1st June 2017. Kyiv: DP «UkrNDNTs» [in Ukrainian].
2. *Budivelni konstruktсии. Metody vyprobuvan na vohnestiiikist. Zahalni vymohy. Pozhezhna bezpeka* [Building structures. Fire resistance test methods. General requirements. Fire Security] (ISO 834: 1975). (2005). DSTU B V.1.1-4-98* from 28 October 1998. Kyiv: Ukrarkhbuildinform [in Ukrainian].
3. *Actions on structures – Part 1–2: General actions – Actions on structures exposed to fire Part 1-2: General rules – Structural fire design EN 1991-1-2: 2002 Eurocode 1*. Brussels. 2002 [in English].
4. *Design of concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2*. Brussels. 2004 [in English].
5. Long T. Phan, Therese P. McAllister, John L. Gross, Morgan J. Hurley (2010). *Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings*. NIST Technical Note 1681, 217. [in English].
6. Pozdieiev, S. V., Levchenko, A .D. (2011). *Rozrobka utochnenoho rozrakhunkovoho metodu dlia vyznachennia mezhi vohnestiiikosti nesuchykh zalizobetonnykh konstruktсии* [Development of a refined calculation method for determining the limit of fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures]. *Naukovyi visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Teoriiia i praktyka budivnytstva, 697, 264–269. [in Ukrainian].
7. Taras Shnal, Serhii Pozdieiev, Oleksandr Nuianzin, Stanislav Sidnei (2020). *Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions*. *Materials Science Forum*, 1006, 107–116. [in Ukrainian].

RESEARCH OF THE BEHAVIOR OF A REINFORCED CONCRETE STAIRCASE IN THE CONDITIONS OF THE THERMAL INFLUENCE OF FIRE

I. Nesen

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS: ANNOTATION

reinforced
concrete
staircase, fire
resistance,
bearing capacity,
finite element
method

The article analyzes mathematical models describing thermal conductivity and the stress-strain state in reinforced concrete marches under the influence of the standard fire temperature mode. In order to conduct a study of the behavior of reinforced concrete stairwells under fire conditions, the main provisions and assumptions were formulated for calculating the parameters of heat propagation and the stress-strain state that occur in reinforced concrete stairwells under such conditions. On the basis of the formulated provisions and assumptions, appropriate mathematical models based on the application of the finite element method in a non-linear formulation were substantiated, and a numerical experiment was conducted based on them to identify the features of temperature distribution, deformation and destruction of a reinforced concrete staircase under the influence of a standard fire temperature regime. According to the obtained data, the regularities of the dependence of the fire resistance limit of a reinforced concrete staircase on its structural parameters were analyzed. The results of the research made it possible to formulate the following conclusions. At the same time, the limits of the fire resistance of a reinforced concrete stairwell are determined according to the load-bearing capacity at different levels of mechanical load during the exposure time of the standard fire temperature regime in the interval from 0 to 120 minutes. The highest limit of fire resistance in terms of bearing capacity for a reinforced concrete staircase with a mechanical load level of $0.2Q_{\max}$ was 105 min, and the smallest was 21 min for a load level of $0.9Q_{\max}$. When studying the stressed-deformed state of a reinforced concrete staircase under the conditions of mechanical load and the thermal effect of fire, its parameters were calculated, as a result of which it was found that the dependence of the fire resistance limit for bearing capacity on the level of mechanical load is close to linear. The scenario of the destruction of a reinforced concrete staircase under fire conditions was studied, which sees the cause of its destruction during heating in the destruction of a layer of concrete in the area near the reinforcing bars and the formation of a local deformation zone in this area. The developed algorithms for calculating the parameters of the stress-strain state of a reinforced concrete staircase can be used in complex numerical studies to assess the fire resistance limits of such staircases.