

УДК 624.012

С.В. Поздєєв, д.т.н., доц.,  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ СТІНИ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У статті наведені відомості щодо параметрів напружено-деформованого стану та механізму руйнування залізобетонної стіни в умовах впливу пожежі із стандартним температурним режимом.

**Ключові слова:** вогнестійкість, «стандартна пожежа», залізобетонна стіна, метод кінцевих елементів.

**Постановка проблеми.** Для зменшення ризику значних соціально-економічних втрат під час пожеж в будівлях і спорудах існує необхідність забезпечення надійної роботи залізобетонних стін за умов теплової дії пожежі, тобто гарантування їх відповідності існуючим нормативно-технічним нормам, які регламентують межі їх вогнестійкості [1]. При визначенні фактичних меж вогнестійкості вважається найбільш надійнішим і достовірним метод натурних вогневих випробувань [1]. Метод вогневих випробувань полягає в нагріві натурального зразка, який повністю або частково відповідає реальному елементу залізобетонної конструкції в спеціальній вогневій печі при температурному режимі, який визначений в нормативах [1 - 3] і називається стандартною температурною кривою пожеж, з прикладенням відповідного механічного навантаження. Випробування залізобетонних несучих стін на вогнестійкість відбувається у відповідності до чинних стандартів України [2, 3]. Згідно із цими стандартами стіна повинна бути піддана вогневій дії в умовах її навантаження і спираючості у відповідності до розрахункової схеми конструкції будівлі. При реалізації таких умов виникають певні технічні складності, які полягають у невідповідності умов закріплення і навантаження стіни у конструкції, невідповідності габаритних розмірів зразка для випробувань і реальної стіни і т.д. Крім цього метод вогневих випробувань є затратним і трудомістким.

Альтернативою експериментальним методам є застосування розрахункових методів. На даний час теоретична та методична база щодо такого підходу міститься у серії нормативних документів [4], чинних в Україні. Дані методи є гнучкими, дозволяють врахувати все розмаїття граничних умов, матеріалів, геометричних розмірів та ін. параметрів стін, а також вони є набагато менш трудомісткими та вартісними.

Багато цих методів засновані на гіпотезах опору матеріалів і добре працюють тоді, коли є чітке уявлення про поведінку елементу конструкції в умовах пожежі. Відсутність такої інформації накладає обмеження на застосування розрахункових методів, адже її отримання пов'язане з проведенням масштабних експериментів. Для рішення цих задач ефективним є застосування математичного моделювання зі залученням важких комп'ютерних інженерних систем, заснованих на методі кінцевих елементів, оскільки дозволяє отримати великий обсяг даних щодо поведінки несучих стін під час пожежі. З огляду на викладене можна зазначити важливість та актуальність задач вивчення поведінки несучих залізобетонних стін під час пожежі.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** В роботі [5] запропонований підхід вивчення поведінки залізобетонних конструкцій під час пожежі, що полягає у проведенні математичного моделювання за методом кінцевих елементів (далі – МКЕ), доповненим математичними моделями пластичного деформування, теорії міцності, моделі зміни механічних властивостей матеріалу за наявності тріщини у точці інтегрування і т.п. Даний підхід відноситься до уточнених розрахункових методів і дозволяє дуже точно описати поведінку елементів залізобетонних конструкцій в умовах пожежі. В даній роботі було

багато уваги приділено поведінці залізобетонних балок і плит. Щодо стиснутих елементів - колон і стін така увага не приділялася. Робота колон за таким підходом досліджувалася у роботі [6]. Існують ціла низка робіт, присвячених поведінці несучих стін в умовах пожежі, детальний аналіз яких поданий у дисертації [7]. Але досі залишаються відкритими питання розподілень параметрів напружено-деформованого стану (далі – НДС) у перерізі, деформаційні схеми, розподілення дефектів, а також відомості щодо механізму та причин руйнування несучих залізобетонних стін під час пожежі.

У зв'язку з цим сформульована мета дослідження.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Мета роботи полягає у визначенні основних параметрів напружено-деформованого стану, схем деформування, розподілення дефектів, а також відомості щодо механізму та причин руйнування несучих залізобетонних стін під час пожежі при застосуванні методу кінцевих елементів.

На рис. 1 подана схема армування залізобетонної стіни, що розглядається.

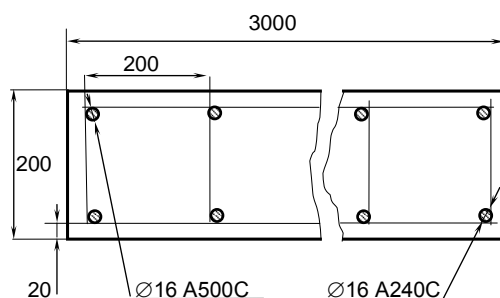


Рисунок 1 – Схема армування залізобетонної стіни.

Для вивчення поведінки залізобетонних несучих стін була розглянута залізобетонна стіна, основні технічні параметри якої наведені у табл. 1.

Таблиця 1 - Основні параметри залізобетонної стіни.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
• ширина	$s$	0,2	м
• ширина захисного шару	$w$	0,02	
• довжина стіни	$l$	3,2	
• висота стіни	$h$	3	
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	$\rho_b$	2300	кг/м <sup>3</sup>
Гранична вологість	$u$	< 3	%
Робоча арматура внутрішня:		Клас А500С	м
• діаметр	$d_1$	0,016	
Робоча арматура зовнішня:		Клас А240С	м
• діаметр	$d_2$	0,016	
Каркасна арматура:		Клас А240С	м
• діаметр	$d_3$	0,008	

Для описання поведінки залізобетонної стіни під час пожежі були проаналізовані підходи до розв'язку подібних задач [4, 5]. Аналіз підходів у даних джерелах дозволив сформулювати основні передумови й допущення, які можна сформулювати в такому загальному вигляді:

1. Математична модель температурної й механічної реакції на тепловий вплив пожежі описується за допомогою рівняння теплопровідності й системи диференціальних рівнянь НДС твердого тіла при їхній чисельній реалізації на базі МКЕ.

2. Для розв'язку теплотехнічної задачі використовується нестационарне двовимірне квазілінійне рівняння теплопровідності з ефективними теплофізичними характеристиками (ТФХ) бетону згідно з нормативними документами [4] у допущенні, що НДС на них не впливає.

3. Враховується можливість тріщиноутворення в матеріалі стіни при розтяганні, а при стиску поведінка кам'яної кладки має нелінійний характер з урахуванням спадаючої гілки діаграми деформування, параметри якої залежать від температури.

4. Тріщиноутворення в бетоні визначається відповідною теорією міцності бетону.

5. Пластична деформація матеріалу визначається асоціативною теорією пластичності.

6. Стан тотального руйнування стіни визначається критичними деформаціями, пов'язаними з утворенням зони локального пластичного деформування.

Для розв'язку поставленої задачі необхідне завдання комплексу початкових даних, до яких відносяться властивості матеріалу стіни, та параметри граничних умов, що враховують прикладенні навантаження, та теплову дію. На рис. 2 наведені теплофізичні характеристики бетону, з якого виготовлена стіна, що описані у чинному стандарті України [4] щодо розрахунку залізобетонних конструкцій на вогнестійкість. Дані характеристики являють собою температурні залежності ефективних характеристик, які описують матеріал як однорідний та ізотропний, що є допустимим при таких розрахунках [4, 5].

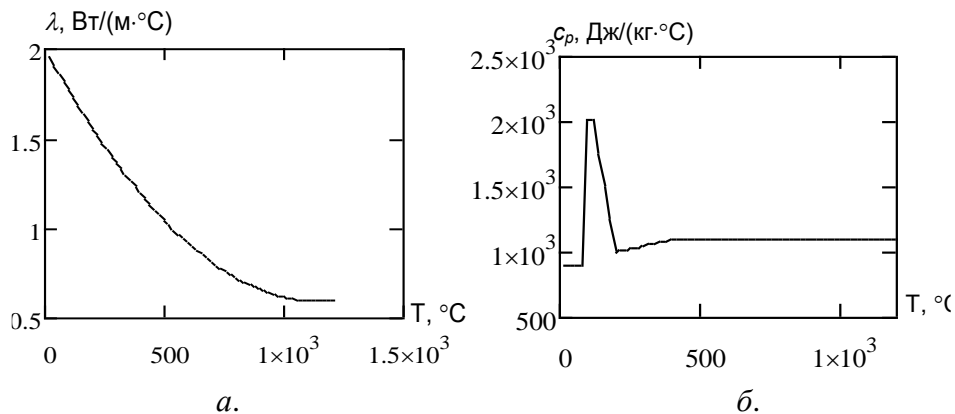


Рисунок 2 – Теплофізичні характеристики кладки з блоків із легкого бетону: коефіцієнт теплопровідності (а), питома теплоємність (б).

На рис.3 подані термомеханічні властивості бетону, що були використані для розрахунку.

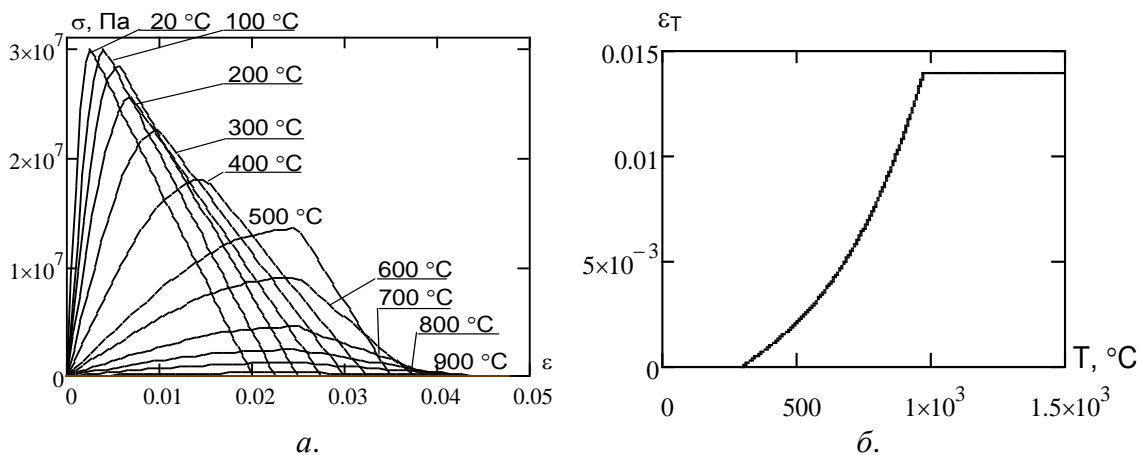


Рисунок 3 – Термомеханічні характеристики бетону: діаграми деформування (а), температурні деформації (б).

На рис.4 подані термомеханічні властивості арматурної сталі

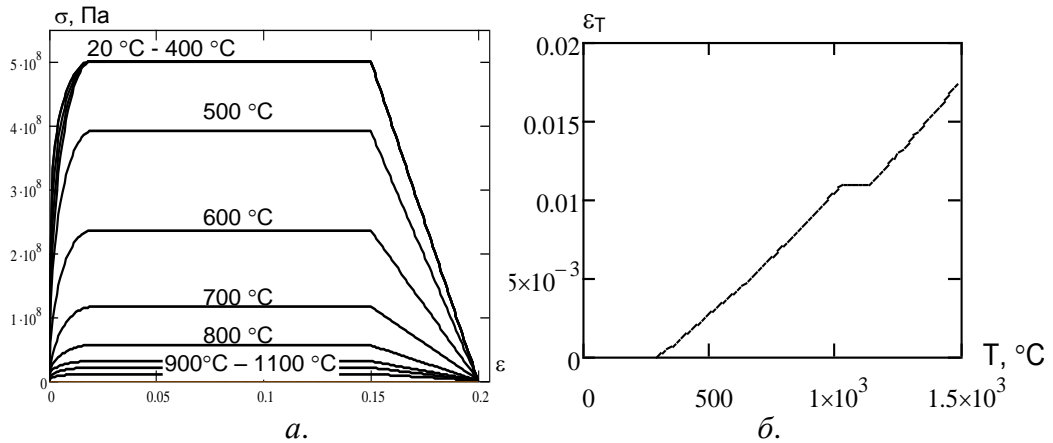


Рисунок 4 – Термомеханічні характеристики арматурної сталі: діаграми деформування (а), температурні деформації (б).

Для проведення розрахунку були використані математичні моделі, параметри яких подані у табл. 2.

Таблиця 2 - Основні математичні моделі для розрахунків стіни на вогнестійкість.

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

При проведенні розрахунку були прийняті розрахункові схеми до теплотехнічної та статичної задач, що наведені на рис. 5.

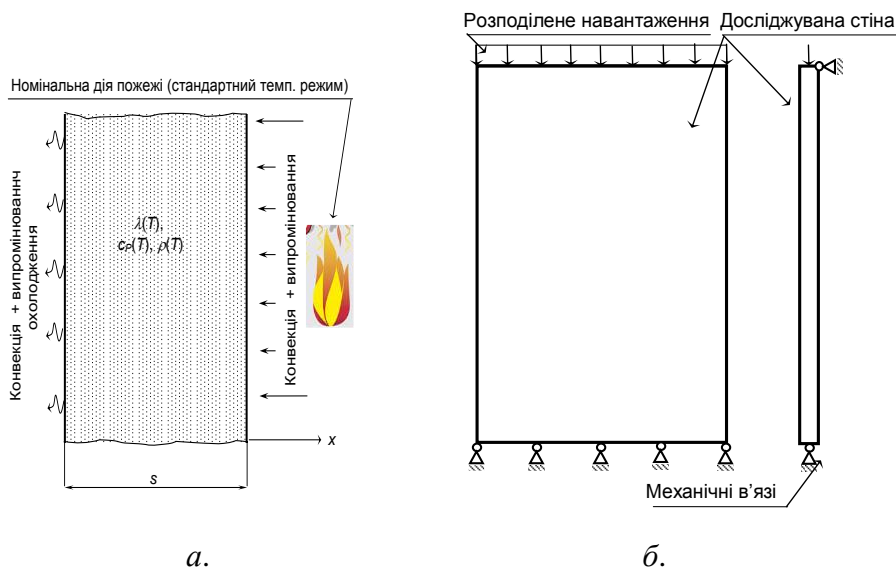


Рисунок 5 – Розрахункові схеми: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б).

Використані характеристики відповідають вимогам стандарту України [5]. Міцнісні характеристики являють собою набір діаграм «напруження-деформація» із спадними гілками для певних значень температури нагріву матеріалу. Також на цьому рисунку подані температурні деформації бетону і арматурної сталі.

Для завдання граничних умов були використані параметри, спираючись на чинні стандарти 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 конвекційного теплообміну на поверхні, що обігривається	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	25	[4]
Коефіцієнт конвекційного теплообмін на поверхні, що не обігривається	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	6	[4]
Ступінь чорноти	-	0.85	[4]
Постійна Стефана-Больцмана	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	5.67·10 <sup>-8</sup>	[6]
Параметри граничних умов статичної задачі			
Діюче навантаження	т/м <sup>2</sup>	150	-
Коефіцієнт Пуасона	-	0,2	[4]

Для проведення розрахунку були побудовані сіткові моделі стіни, вигляд яких поданий на рис. 6.

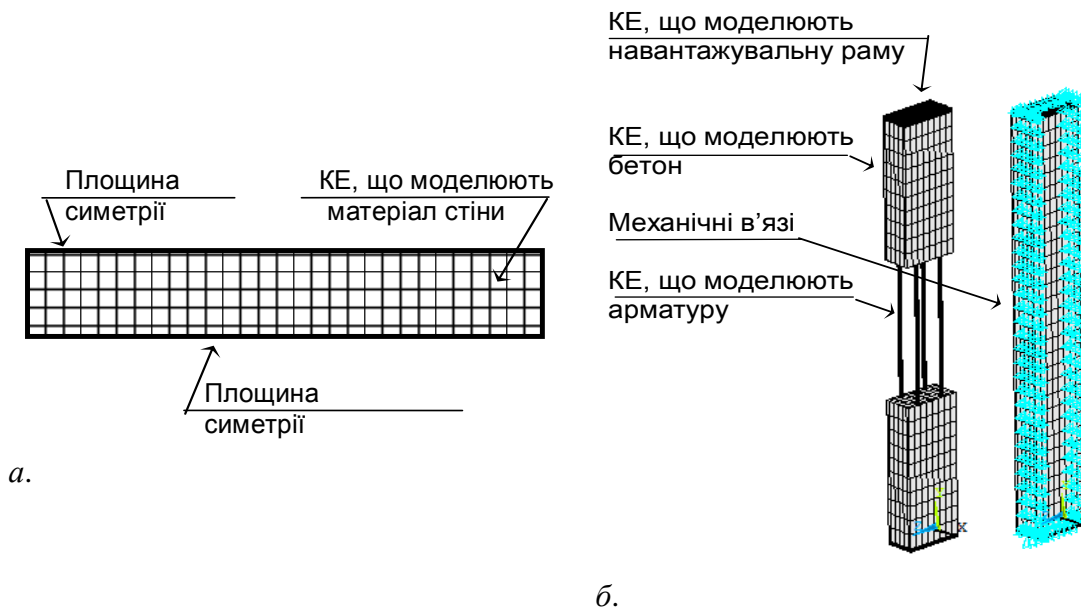


Рисунок 6 – Сіткові моделі: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б).

При побудуванні сіткових моделей було враховано, що сітка для вирішення теплової задачі відповідно до розрахункової схеми (див. рис. 3) є одномірною і повинна бути набагато густішою. Сітка для статичної задачі повинна бути більш грубою і враховувати місцеву особливість більшого нагрівання внутрішніх шарів, прилеглих до обігрівної поверхні. Тому в даних шарах вона також повинна бути густішою.

З метою зменшення обсягу розрахунків розглядається малий фрагмент стіни, оскільки напружено-деформований стан вздовж стіни майже не змінюється. Робота фрагменту у цілій

стіні враховується за допомогою встановлення граничних умов симетрії по її бокам. Такі умови забезпечуються встановленням відповідних односторонніх механічних в'язів. Накладання температур у вузлові точки відбувається шляхом лінійної інтерполяції.

З метою зменшення обсягу розрахунків розглядається малий фрагмент стіни, оскільки напружено-деформований стан вздовж стіни майже не змінюється. Робота фрагменту у цілій стіні враховується за допомогою встановлення граничних умов симетрії по її бокам. Такі умови забезпечуються встановленням відповідних односторонніх механічних в'язів. Накладання температур у вузлові точки відбувається шляхом лінійної інтерполяції.

В результаті вирішення теплотехнічної задачі були отримані температурні розподілення, які наведені на рис. 7.

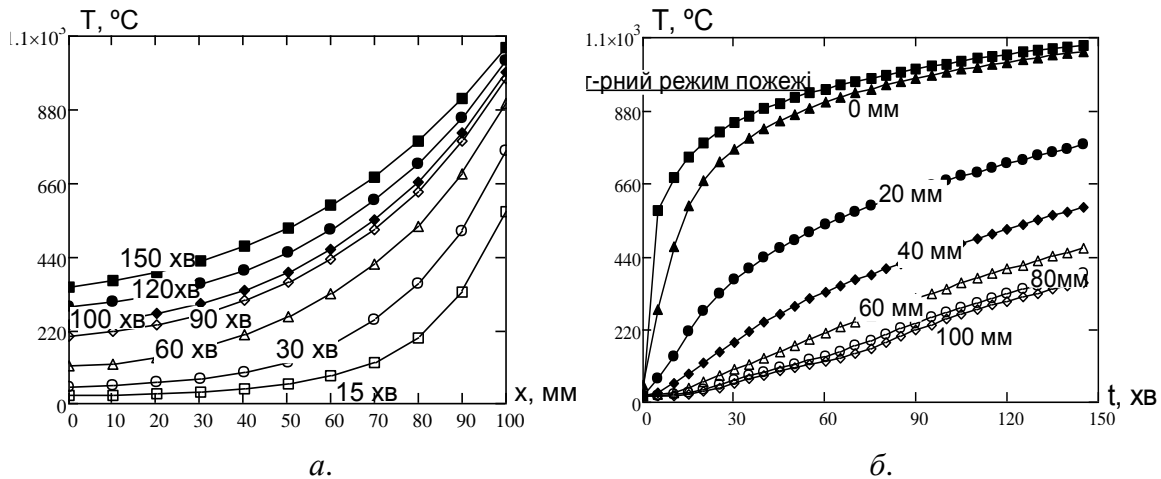


Рисунок 7 – Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі стіни (а); температурні режими прогрівання внутрішніх шарів стіни (б).

Для вирішення статичної задачі були розглянуті різні рівні механічного навантаження. Розрахунковим шляхом було визначена величина руйнуючого тиску на стіну, що складає  $2100 \text{ т/м}^2$ . Для вивчення впливу величини навантаження були прикладені значення навантаження з ряду  $0,1 \cdot p_{\text{max}}, 0,3 \cdot p_{\text{max}}, 0,5 \cdot p_{\text{max}}, 0,7 \cdot p_{\text{max}}$ .

Після вирішення статичної задачі були отримані графіки вертикальних переміщень верхнього краю стіни, а також горизонтальних переміщень її середини. Отримані графіки наведені на рис. 8.

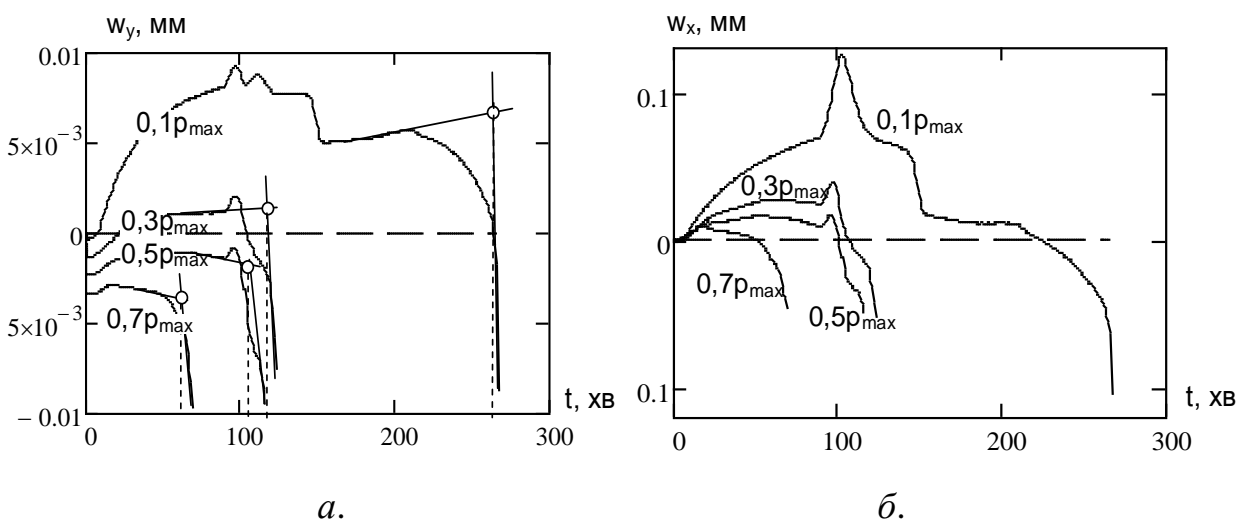


Рисунок 8 – Результати вирішення статичної задачі: вертикальні переміщення верхнього краю стіни (а) горизонтальне переміщення середини стіни (б).

Згідно з отриманими графіками видно що стіна спочатку згинається у бік вогневої дії пожежі з одночасним переміщенням вверх верхнього краю стіни. На кінцевому етапі стіна вирівнюється і прогин майже зникає. На етапі руйнації згин відбувається у бік, протилежний вогневій дії пожежі. При цьому для навантажень з величиною  $0,1 \cdot p_{\max}$ ,  $0,3 \cdot p_{\max}$  верхній край спочатку рухається вверх і на певному етапі переміщення стають позитивними, тобто маємо збільшення висоти стіни. При руйнуванні стіни її висота знову зменшується при наростанні прогину у бік, протилежний вогневій дії. При більших навантаженнях збільшення висоти стіни не спостерігається. Така картина пояснюється тим, що спочатку шари з боку вогневої дії пожежі розширюються і за рахунок цього відбувається згин стіни і поздовжнє переміщення її верхнього краю вверх. При подальшому поступовому прогріванню стіни її більш глибокі шари розширюються, тоді як після досягнення певної температури більш прогріті шари більше не розширюються (див. рис. 3), і тому прогин стіни зменшується. За рахунок того, що більш прогріті шари більш легко деформуються на кінцевому етапі відбувається прогин у бік, протилежний дії вогню. Результатом такої картини відбувається втрата стійкості стіни і вона руйнується.

Отримані графіки дозволяють отримати дані про настання граничного стану втрати несучої здатності шляхом порівняння поточних значень переміщень і швидкостей з гранично допустимими, що визначаються за формулами [2, 3]:

$$D = 0.01h = 32 \text{ мм}; dD/dt = 3h/1000 = 9,6 \text{ мм/хв.} \quad (1)$$

Аналіз отриманих графіків показує, що за критеріями (1) граничний стан втрати несучої здатності не настає. Але вигляд графіків на рис. 8 показує, що на кінцевій їх ділянці відбувається різке нарощування деформацій, що вказує на утворення локальної зони пластичних деформацій, що є свідченням настання граничного стану втрати несучої здатності. Для визначення межі вогнестійкості був використаний спосіб дотичних, описаний в [6]. За дотичними на ділянках кривих вертикальних переміщень, показаних на рис. 8 визначаємо межі вогнестійкості стіни, підданої механічним навантаженням із різними значеннями. Залежність межі вогнестійкості за несучою здатністю від величини прикладеного навантаження подана на рис. 9.

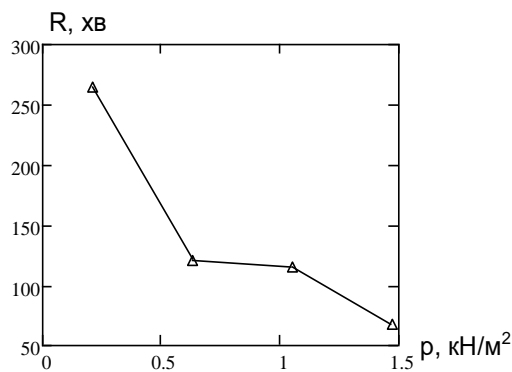


Рисунок 9 – Залежність межі вогнестійкості стіни від прикладеного до неї тиску.

**Висновки.** З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

1. Виконане чисельне дослідження поведінки залізобетонної стіни під час дії пожежі із стандартним температурним режимом.
2. Показано, що стіна під час випробування спочатку прогинається у бік вогневої пожежі а потім змінює напрямок поздовжнього згину проходячи початкове положення її нейтральної вісі.

3. Показано, що граничний стан втрати стійкості стіни відбувається з причини утворення зони пластичних деформацій з причини поздовжнього згину після проходження початкового положення нейтральної вісі.

4. Виявлена залежність межі вогнестійкості від величини прикладеного тиску до стіни. При цьому в діапазоні навантажень  $0,3 \cdot p_{\max} \dots 0,5 \cdot p_{\max}$  межа вогнестійкості практично не залежить від прикладеного навантаження

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002 [Чинний від 2003-05-01.]. – К.: Видавництво “Лібра”, 2003. – 87 с – (Національний стандарт України).
2. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с – (Національний стандарт України).
3. ДСТУ Б В.1.1-19: 2007. Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість. – К.: Укрархбудінформ, 2008. 37 с – (Національний стандарт України).
4. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.
5. Поздєєв С.В. Розробка уточненого розрахункового методу для визначення межі вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. / Поздєєв С.В., Левченко А.Д. // Науковий вісник національного технічного університету «Львівська політехніка». – Львів: НТУ «Львівська політехніка». - 2011. – С. 264 – 269.
6. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
7. Ruvalcaba Ayala F.R. Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy. – 2010. – 294 p.