

УДК 624.012

Д.О. Ступак, к.т.н., доц., О.М. Нуянзін, к.т.н., Ю.А. Отрош, к.т.н., доц., В.К. Словінський,  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені героїв Чорнобиля  
НУЦЗ України

### УТОЧНЕНИЙ МЕТОД ВІДПОВІДНО EUROCODE 6 ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ КАМ'ЯНИХ СТІН

В статті описані основні процедури та область застосування уточненого розрахункового методу відповідно до системи європейських стандартів оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій на прикладі несучих кам'яних стін, який заснований на моделюванні поведінки будівельних конструкцій в умовах нагріву за стандартною температурною кривою пожежі в комп'ютерній МКЕ-системі типу ANSYS.

**Ключові слова:** Проектування, вогнестійкість, EUROCODE.

У зв'язку з переходом фахівців до нової системи проектування залізобетонних конструкцій EN 1992-1-1 (Загальні правила і правила для будівель) і EN 1992-1-2 (Загальні правила визначення вогнестійкості), що міститься у відповідному сучасному стандарті України 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), який є аналогом цих європейських документів, актуальною є задача розробки уточнених методів відповідно до системи Єврокодів для визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, зокрема кам'яних стін з різних матеріалів.

Проектування протипожежного захисту будівель і споруд охоплює широкий спектр підходів до врахування природи і впливів різних навантажень, а також засобів забезпечення відповідного опору конструкцій вогневному впливу протягом необхідного часу. З одного боку, існує елементарна довіра до опублікованих табличних даних, заснованих на спрощених оцінках як вогневого, так і силового (від прикладених навантажень) впливів на конструкції під час пожежі. Прийняте рішення за методикою розрахунку залежить від конкретних обставин, що відносяться до проекту, вимог замовника і регламентуючих органів. Необхідно враховувати фінансові наслідки прийняття більш складного підходу до розрахунку конструкцій, що перебувають в умовах пожежі. Такі методи можуть бути обґрунтовані там, де необхідна значна економія матеріалів або необхідна підвищена протипожежна безпека (понад ту, яка регламентується національними стандартами).

Методи розрахунків, засновані на застосуванні більш точних математичних моделей поведінки будівельних конструкцій в умовах пожежі, називаються уточненими [1, 2]. При застосуванні уточнених методів визначення вогнестійкості будівельних конструкцій одним з найбільш ефективних є метод кінцевих елементів (МКЕ), оскільки він є універсальним, а алгоритми його чисельної реалізації дуже добре відпрацьовані й дозволяють врахувати всі значимі особливості поведінки будівельних матеріалів при комбінованій дії високотемпературного нагрівання й механічних навантажень. Крім цього, дані алгоритми застосовуються в універсальних комп'ютерних МКЕ-системах типу ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, LIRA та ін., у яких реалізовані найбільш ефективні математичні моделі поведінки матеріалів, що враховують великий обсяг наукових даних закордонних і вітчизняних дослідників.

Ці методи розрахунку забезпечують більш раціональну основу проектування протипожежного захисту будівель і споруд, що надає інженерам, архітекторам і кінцевим користувачам свободу вибору при проектуванні нових і відновленні (наступної експлуатації) існуючих об'єктів. Взагалі кажучи, згадана свобода вибору досягається ціною збільшення обсягів проектних, в тому числі розрахункових робіт.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Метою даної роботи є розвиток методології застосування уточнених методів розрахунків меж вогнестійкості будівельних конструкцій, заснованих на використанні методу кінцевих елементів, куди входить розробка вимог до бази початкових даних щодо матеріалів, граничних умов, побудовання розрахункових схем та сіткових моделей, набору обов'язкових постпроцесорних даних, а також критеріальної бази щодо ідентифікації настання граничних станів втрати несучої здатності та втрати цілісності за отриманими результатами розрахунку.

В роботі [3] розвинений уточнений розрахунковий підхід до визначення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій, заснований на уточнених математичних моделях поведінки залізобетону в умовах високотемпературного нагріву при номінальній тепловій дії пожежі за стандартним температурним режимом.

Для адаптації такого підходу на прикладі кам'яних стін була розглянута стіна з блоків із легкого бетону, початкові параметри якої наведені у табл. 1.

Таблиця 1 - Основні параметри стіни

| Параметр                      | Позначення                                 | Значення         | Одиниця виміру    |
|-------------------------------|--|------------------|-------------------|
| Геометричні розміри фрагменту |  |                  |                   |
| • товщина стіни               | $s$  | 0,2              | м                 |
| • ширина стіни                | $l$  | 1,5              |                   |
| • висота стіни                | $h$  | 3,2              |                   |
| Тип бетону блоків             | Легкий на заповнювачі із спученого перліту | Клас LC 8/9 (B8) |                   |
| Густина бетону                | $\rho_B$                                   | 800              | кг/м <sup>3</sup> |
| Гранична вологість            | $u$  | < 3              | %                 |

На рис. 1 наведені теплофізичні характеристики кладки згідно чинного стандарту України [1]. Дані характеристики являють собою температурні залежності ефективних характеристик, що описують матеріал як однорідний та ізотропний, що є допустимим при таких розрахунках [1 – 3, 8].

На рис. 2 подані термомеханічні характеристики матеріалу стіни. Наведені характеристики відповідають вимогам стандарту України [1]. Характеристики міцності являють собою набір діаграм «напруження-деформація» із спадними гілками для певних значень температури нагріву матеріалу. Також на цьому рисунку наведені температурні деформації матеріалу стіни.

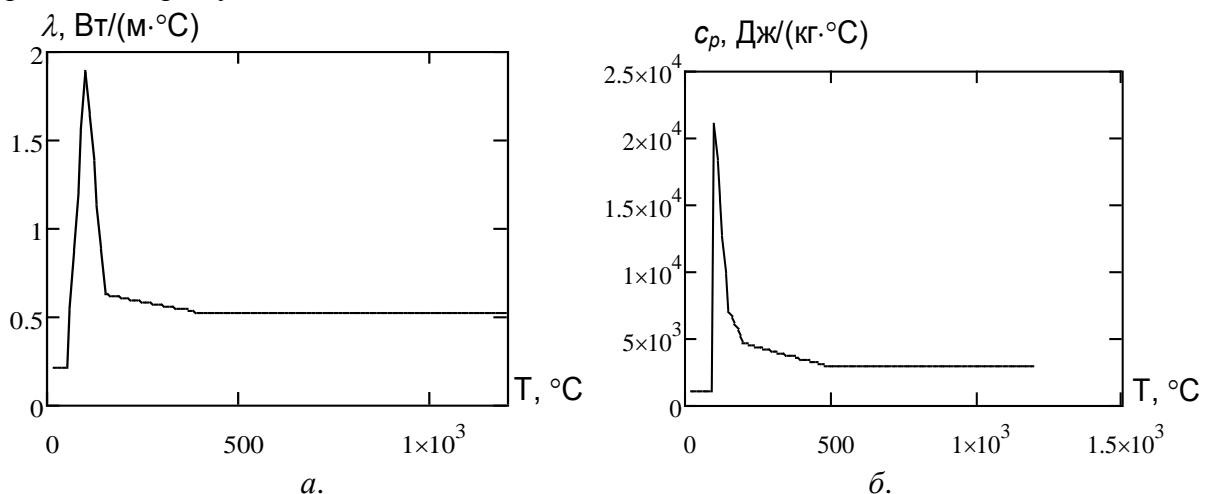


Рисунок 1 – Теплофізичні характеристики кладки з блоків із легкого бетону: коефіцієнт теплопровідності (а), питома теплоємність (б).

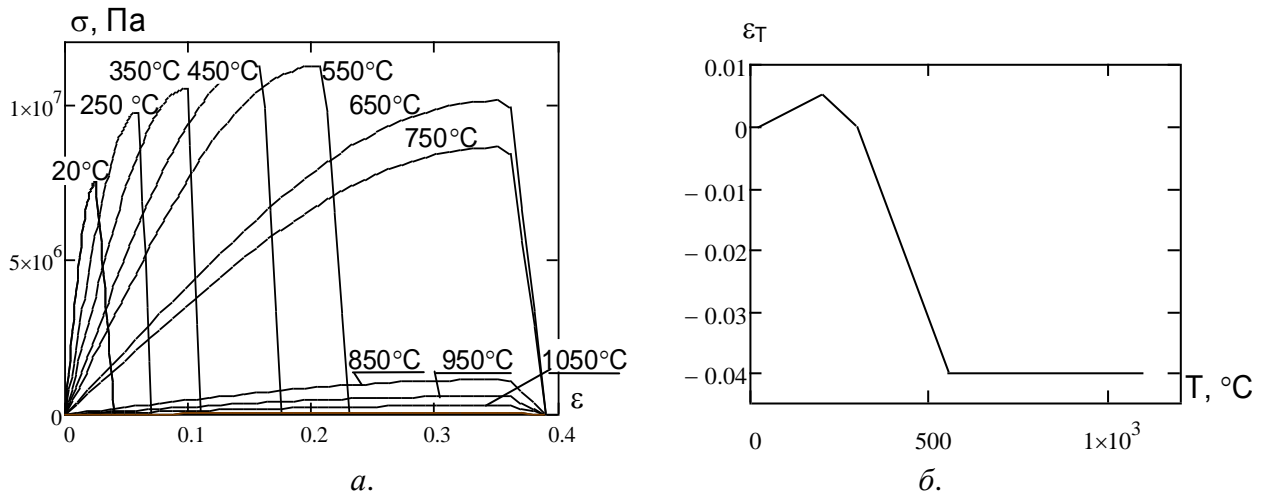


Рисунок 2 – Термомеханічні характеристики кладки з блоків із легкого бетону: діаграми деформування (а), температурні деформації (б).

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 з кінцево-елементним наближенням   | [3]   |
| Граничні умови                         | III роду  |       |
| Фізична нелінійність                   | Ітеративний метод Ньютона-Рафсона   | [3]   |
| Статична задача                        |   |       |
| Напружено-деформований стан            | Метод кінцевих елементів  | [3]   |
| Пластичне деформування матеріалу стіни | Багатошарова модель асоціативної теорії пластичного деформування Бесселінга | [3]   |
| Тріщиноутворення                       | Складений критерій міцності бетону Віллема і Варнке                         | [3]   |
| Фізична й геометрична нелінійність     | Ітеративний метод Ньютона-Рафсона   | [3]   |

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.

Для проведення розрахунку були побудовані сіткові моделі стіни в програмному забезпеченні ANSYS, вигляд яких поданий на рис. 3. При побудові сіткових моделей було враховано, що сітка для вирішення теплової задачі 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.

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.

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                    | [2]     |
| Коефіцієнт конвекційного теплообмін на поверхні, що не обігривається | Вт/(м <sup>2</sup> ·К)                 | 6                     | [2]     |
| Ступінь чорноти  | -                                      | 0.85                  | [2]     |
| Постійна Стефана-Больцмана   | Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )   | 5.67·10 <sup>-8</sup> | [3]     |
| Параметри граничних умов статичної задачі                            |  |                       |         |
| Діюче навантаження   | т/м <sup>2</sup>                       | 150                   | -       |
| Коефіцієнт Пуассона  | -                                      | 0,2                   | [3]     |

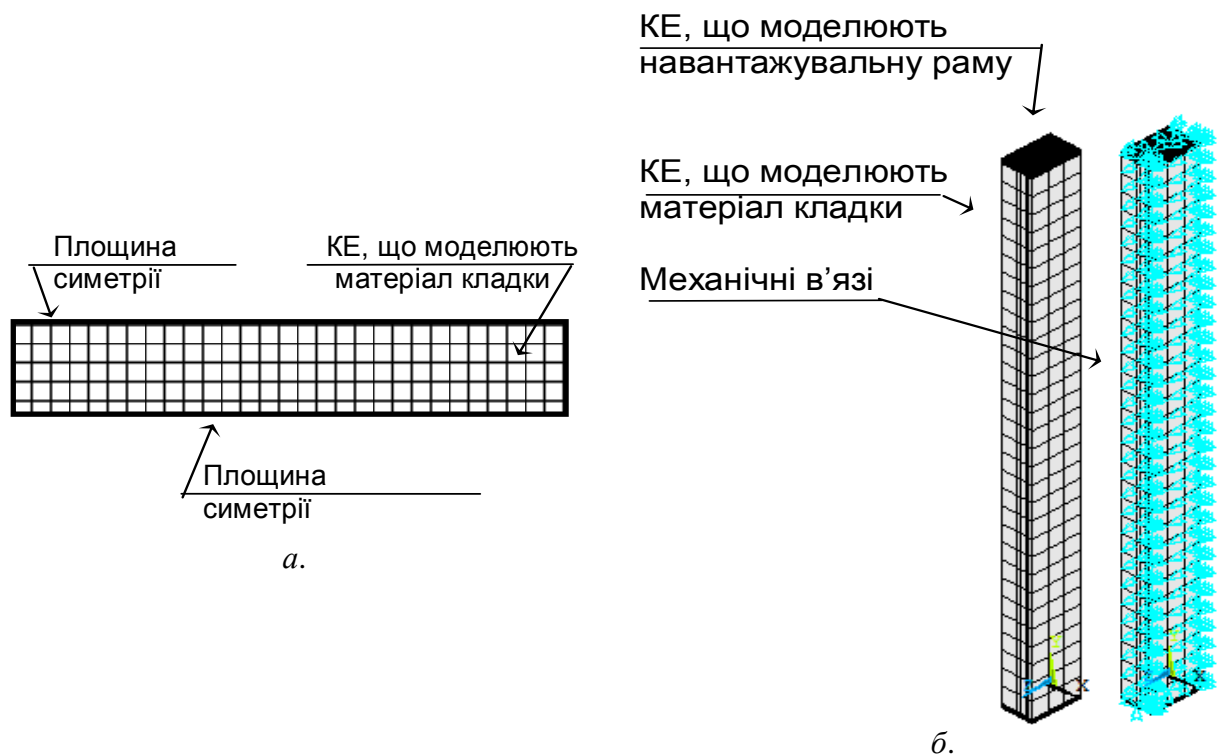


Рисунок 3 – Сіткові моделі: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б) в програмному середовищі ANSYS.

В результаті вирішення теплотехнічної задачі були отримані температурні розподілення, які наведені на рис. 4.

Після вирішення статичної задачі були отримані графіки вертикальних переміщень верхнього краю стіни, а також швидкостей наростання цих переміщень. Отримані графіки наведені на рис. 5.

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 [4, 5]:

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

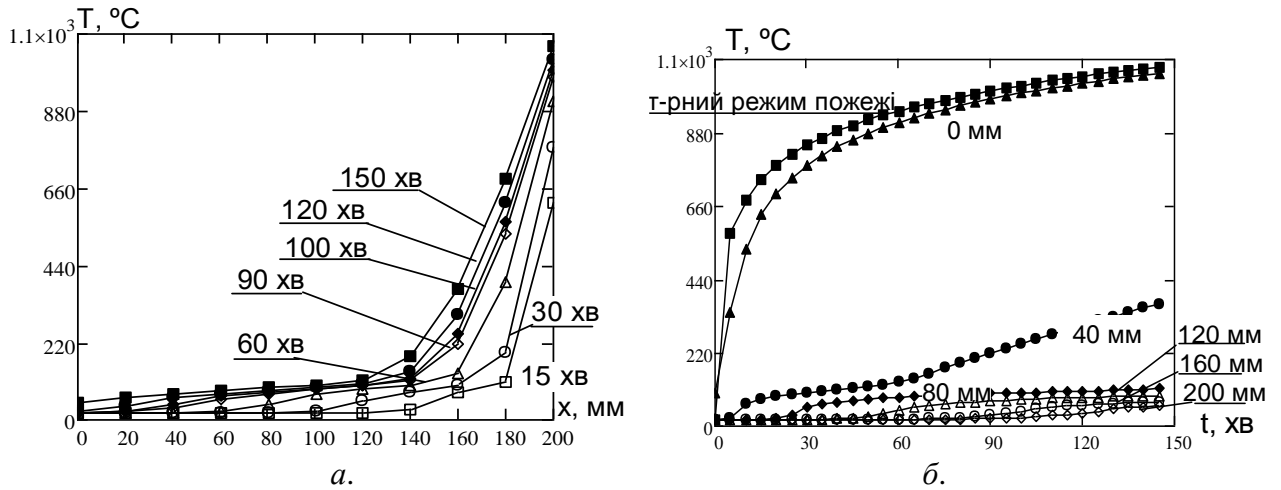


Рисунок 4 – Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі стіни (а); температурні режими прогрівання внутрішніх шарів стіни (б).

Аналіз отриманих графіків показує що на 148 хв настає граничний стан втрати несучої здатності, оскільки в цьому разі вертикальні переміщення перевищують допустиме значення.

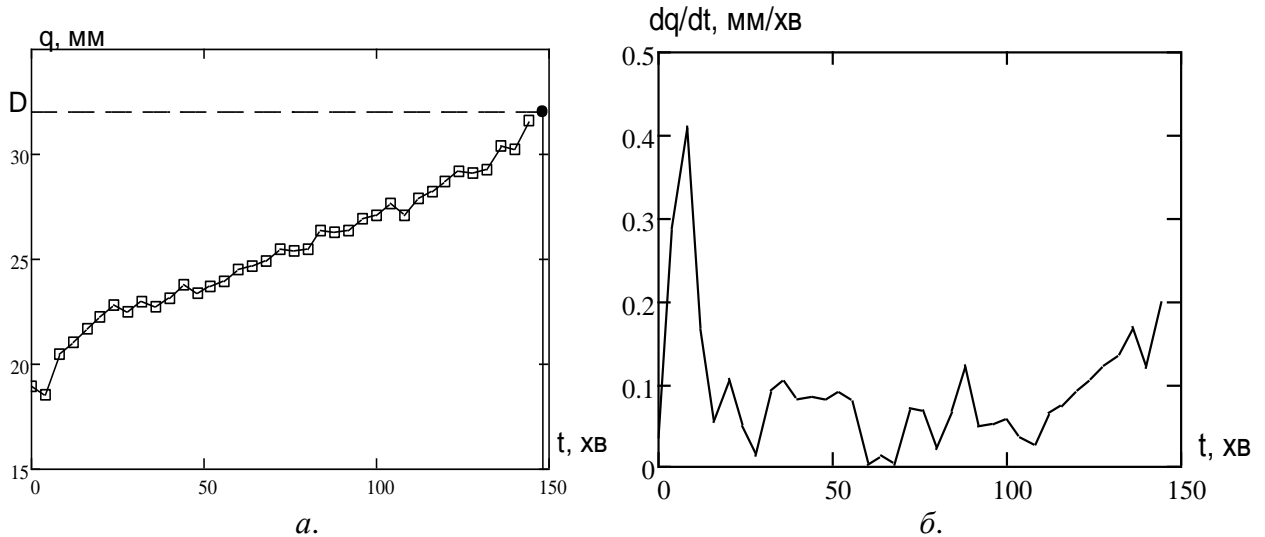


Рисунок 5 – Результати вирішення статичної задачі: вертикальні переміщення верхнього краю стіни (а); швидкість наростання вертикальних переміщень (б).

Для аналізу настання граничного стану втрати цілісності використаний аналіз картин розподілень пошкоджень. На рис. 6 подані розподілення тріщин і положення повністю зруйнованих КЕ, отриманих у результаті розрахунку, у момент настання граничного стану.

Розподілення ушкоджень у стіні показує, що згідно з ознаками настання граничного стану втрати цілісності (наявність тріщин не глибиною не менш як 160 мм та наскрізних тріщин) не відбувається.

Таким чином, уточнений метод, що був запропонований у даній роботі, дозволяє ефективно розраховувати один з типів будівельних конструкцій несучі стіни на вогнестійкість.

**Висновки.**

1. У результаті проведеної роботи був розроблений уточнений розрахунковий метод комплексної оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій на прикладі кам'яних несучих стін.

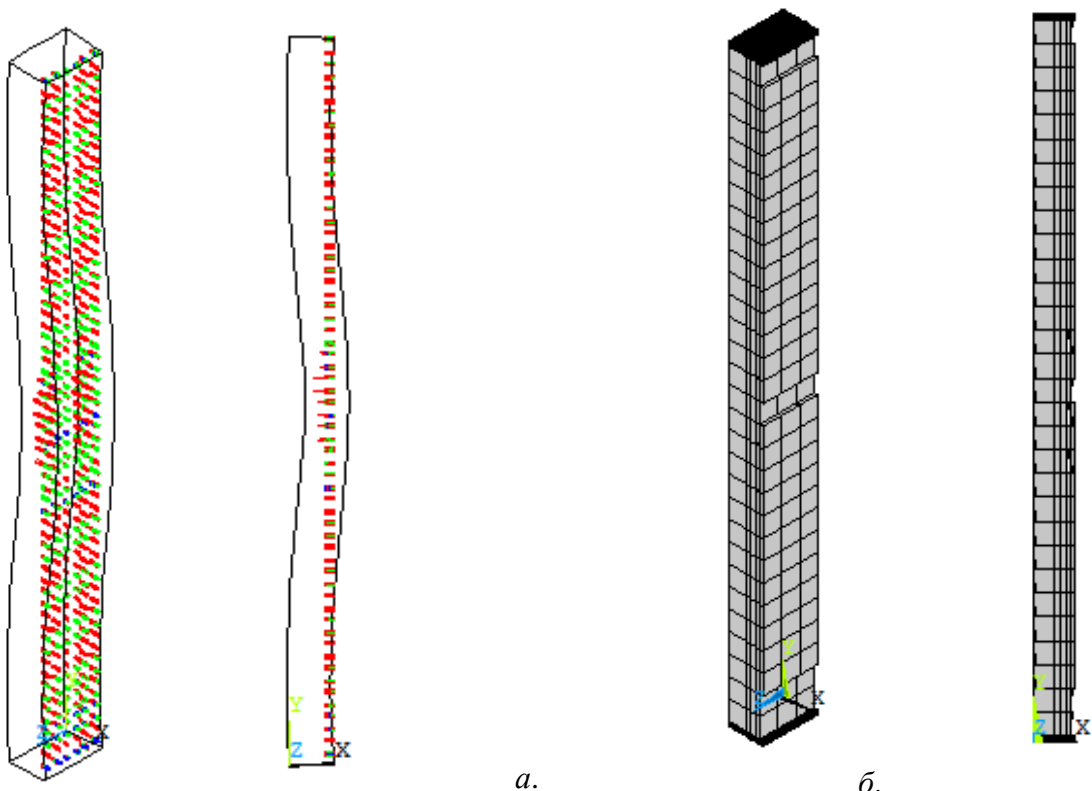


Рисунок 6 – Розподілення тріщин у стіні (а) та повністю зруйнованих елементів (б) у момент настання граничного стану втрати несучої здатності.

2. Сформульовані вимоги до комплексу вихідних даних для проведення розрахунку за запропонованим уточненим методом у відповідності до системи європейських стандартів.

3. Сформульовані вимоги до побудови розрахункових схем та сіткових моделей на прикладі кам'яних несучих стін для проведення розрахунку за запропонованим уточненим методом в програмному забезпеченні ANSYS. Ці вимоги можуть бути використані для інших типів конструкцій.

4. Використовуючи розроблений уточнений метод, була оцінена вогнестійкість несучої стіни з блоків із легкого бетону.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:2012 Проектування кам'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.– К.: Укрархбудінформ, 2013. – 78 с.

2. EN 1996-1-2:2004 Eurocode 6: Design of masonry structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.

3. 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.

4. ДСТУ Б В.1.1-19: 2007. Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість. – К.: Укрархбудінформ, 2008.

5. ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. – К.: Укрархбудінформ, 2005.

6. 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).