

УДК 614.842

РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНОЇ ПЛИТИ ПЕРЕКРИТТЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В.В. Демешок*

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 21.11.2016
Пройшла рецензування: 19.12.2016

КЛЮЧОВІ СЛОВА

вогнестійкість, дерев'яні плити перекриттів, метод кінцевих елементів.

АНОТАЦІЯ

У статті наведені результати дослідження поведінки дерев'яної плити в умовах впливу на неї пожежі зі стандартним температурним режимом з використанням методу кінцевих елементів. На основі проведених досліджень розроблена та апробована методика розрахунку дерев'яних плит на вогнестійкість на основі даних щодо напружено-деформованого стану плити під впливом пожежі.

Останнього часу для зведення будівель, зокрема, багатоповерхових, із перебуванням у них великої кількості людей, великого поширення набуло застосування несучих дерев'яних конструкцій. До таких конструкцій, окрім елементів дерев'яних каркасів, належать дерев'яні плити перекриттів. Такий стан зумовлений тим, що деревина має високу міцність, малу питому вагу, добрі декоративні якості. Будівельні конструкції з деревини мають забезпечувати живучість будівель та споруд під час пожежі відповідно до вимог будівельних норм [1]. Дані вимоги поширюються на показники вогнестійкості та поширення полум'я. При проектуванні будівель дані показники мають бути забезпечені шляхом прийняття відповідних конструктивних рішень, що включають відповідні безпечні геометричні розміри та заходи щодо їх вогнезахисту. На стадії проектування вогнестійких будівельних конструкцій застосовуються розрахункові методи. У даний час теоретична та методична база щодо такого підходу міститься у стандарті [2], чинному в Україні. Вказані методи є гнучкими, дозволяють врахувати всі особливості, що пов'язані із властивостями матеріалів, геометричними розмірами та граничними умовами. При цьому вони є набагато менш трудомісткими та вартісними за експериментальні методи.

Серед існуючих розрахункових методів можна виділити два типи – спрощені та уточнені [3]. Спрощені методи засновані на застосуванні спрощених математичних моделей, отриманих шляхом використання простих розрахункових формул опору матеріалів із уведенням до них коефіцієнтів, отриманих при узагальненні великого обсягу експериментального матеріалу. Останнього часу для розробки інженерних ме-

тодик розрахунку застосовуються уточнені методи, що засновані на математичному моделюванні процесів поведінки дерев'яних конструкцій в умовах пожежі на макрорівні із залучення методу кінцевих елементів при його реалізації у сучасних розрахункових комп'ютерних комплексах таких як ANSYS, Abaqus, SAFIR та інші [4, 5]. З огляду на це, дослідження, спрямовані на створення надійних точних математичних моделей поведінки дерев'яних конструкцій в умовах пожежі є актуальним.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. В роботах [4, 5] запропонований підхід вивчення поведінки дерев'яних плит перекриттів під час пожежі, що полягає у проведенні математичного моделювання за методом кінцевих елементів (далі – МКЕ). Даний підхід відноситься до уточнених розрахункових методів і дозволяє достатньо точно описати поведінку дерев'яних плит перекриттів в умовах пожежі. Отримані математичні моделі у цих роботах при великому обсязі отриманої розрахункової інформації мають суттєвий недолік, що полягає у розгляді деформування дерев'яних плит перекриттів тільки у пружній області. Такий стан зумовлений тим, що сучасні програмні комплекси мають забезпечити відмінність пружно-пластичних властивостей деревини при розтягу та стисканні. Також 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 дерев'яних плит перекриттів під час пожежі.

У зв'язку з цим, сформульована мета дослідження.

*E-mail: dvv1011@ukr.net

Постановка задачі та її розв'язання. Мета роботи полягає у розробці методики розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних плит перекриттів на основі визначених основних параметрів напружено-деформованого стану, схем деформування, розподілення дефектів при застосуванні методу кінцевих елементів. Для

вивчення поведінки дерев'яної плити перекриття були прийняті такі її основні технічні параметри, які наведені у табл. 1. На рис. 1 подана схема конструктивних елементів дерев'яної плити, що розглядається.

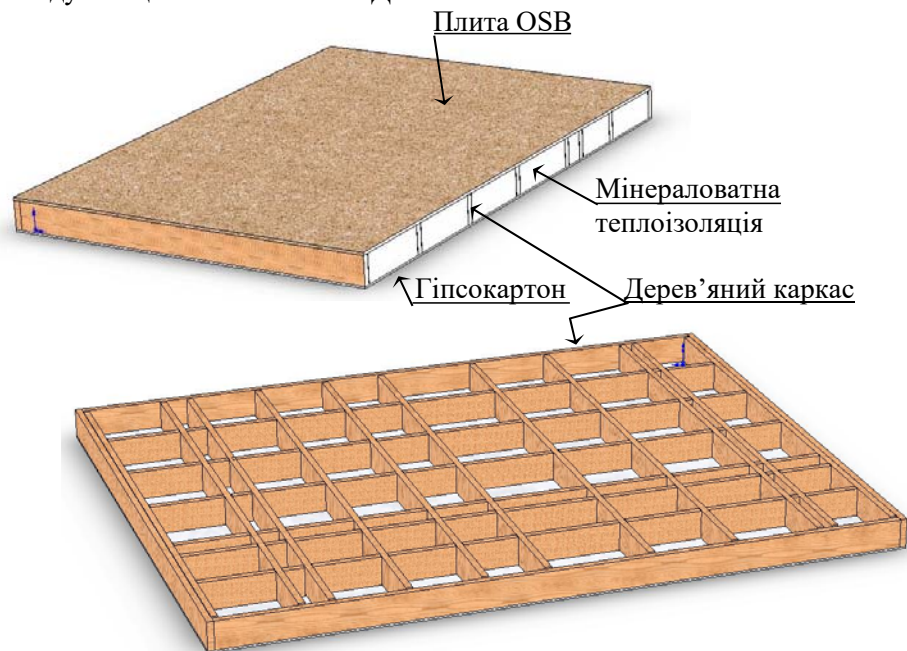


Рисунок 1 - Конструктивна схема дерев'яної плити

Таблиця 1 - Основні параметри дерев'яної плити

| Параметр | Позначення | Значення | Одиниця виміру |
|-------------------------------------|------------------------|----------|-------------------|
| Тип деревини каркаса | Сосна | | |
| Міцність деревини каркаса | f_k | 65 | МПа |
| Модуль пружності | E_d | 11,5 | ГПа |
| Густина деревини каркаса | ρ_d | 530 | кг/м ³ |
| Гранична вологість деревини каркаса | u | < 3 | % |
| Матеріал нижньої панелі | Гіпсокартон | | |
| Матеріал верхньої панелі | Плити OSB EGGER | | |
| Матеріал теплоізоляції | «Данко Ізол» (Україна) | | |

Для описання поведінки дерев'яної плити під час пожежі були проаналізовані підходи до розв'язання подібних задач [4, 5]. Аналіз підходів у даних джерелах дозволив сформулювати основні передумови й допущення, наведені нижче.

1. Для розрахунку використовується система рівнянь НДС твердого тіла.

2. Властивості матеріалу залежать від поточної деформації і температури нелінійно, а також допускаються великі деформації елементів конструкцій, що співставляються з їх розмірами.

3. Для визначення температурного впливу використовуються температурні розподіли, що є результатами попередньо вирішеної теплотехнічної задачі для стандартної температурної кривої пожежі.

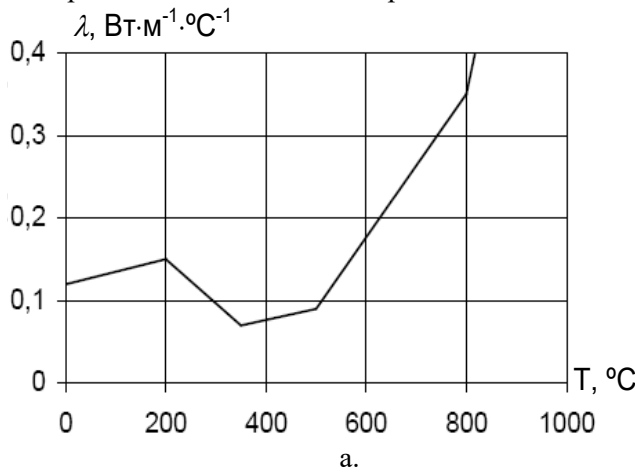
4. Система рівнянь вирішується чисельно, методом кінцевих елементів у комбінації з методом Ньютона-Рафсона, шляхом покрокового додавання діючого механічного навантаження на початковому етапі і покрокового додавання температурних навантажень на заключному етапі з інтервалом 60 с.

5. Для моделювання НДС залізобетону при пожежі використовуються повні діаграми деформування для деревини.

6. Робота пошкодженого елемента і умови його пошкодження визначається відповідною теорією міцності деревини.

7. Критерієм глобального руйнування елемента дерев'яної будівельної конструкції є:

- поява незбійності обчислювального процесу через порушення геометричної незмінності системи;
- досягнення критичних пластичних деформацій в кінцевих елементах моделі;
- досягнення критичних величин глобальних переміщень точок елементів дерев'яних будівельних конструкцій;
- досягнення критичних величин швидкості наростання глобальних переміщень точок



елементів дерев'яних будівельних конструкцій.

Для розв'язання поставленої задачі необхідна постановка комплексу початкових даних, до яких відносяться властивості компонентів матеріалу дерев'яної плити, параметри граничних умов, що враховують прикладені навантаження, та теплову дію. На рис. 2 наведені теплофізичні характеристики деревини каркаса плити, що описані у європейському стандарті [3] щодо розрахунку дерев'яних конструкцій на вогнетійкість. Дані характеристики являють собою температурні залежності ефективних характеристик, які описують матеріал як однорідний та ізотропний, що є допустимим при таких розрахунках [4, 5].

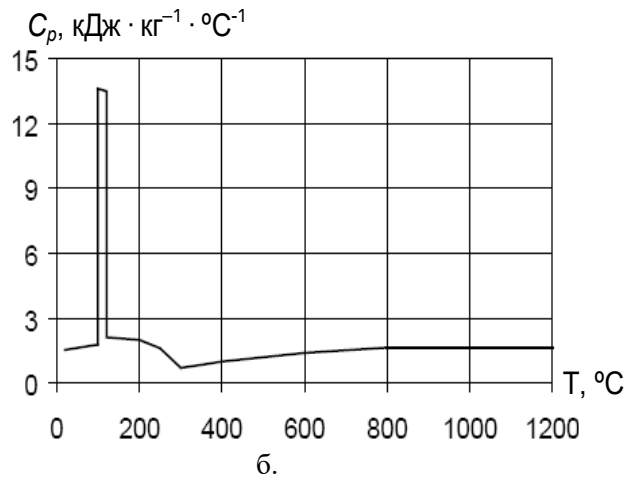


Рисунок 2 – Теплофізичні характеристики деревини: коефіцієнт теплопровідності (а); питома теплоємність (б)

При розрахунках використовувалися теплофізичні характеристики супутніх матеріалів, що наведені у табл. 2 [6].

Таблиця 2 - Теплофізичні характеристики супутніх матеріалів

| Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°С) | Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$, Дж/(м³·°С) | Густина, кг/м³ |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|
| Мінеральна вата | | |
| 0,037 | ρ 1000 | 40 |
| Гіпсокартон | | |
| 0,15 | ρ 950 | 900 |

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

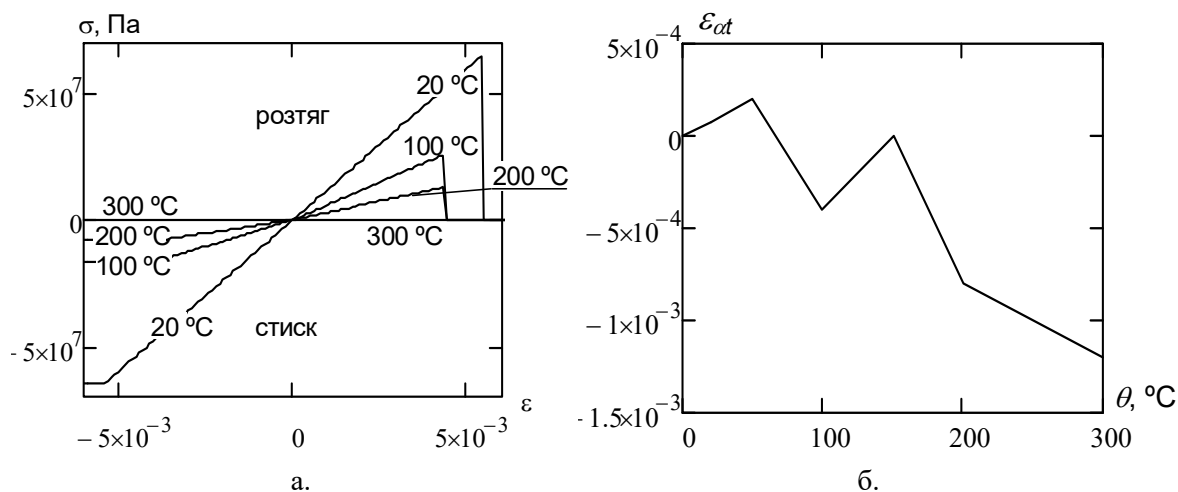


Рисунок 3 – Діаграми деформування деревини при різних температурах нагріву (а) та температурної деформації розширення деревини (б)

Використані характеристики відповідають вимогам європейського стандарту [3]. Механічні характеристики являють собою набір діаграм «напруження-деформація» із спадними гілками для певних значень температури нагрі-

ву матеріалу. Для проведення розрахунку були використані математичні моделі, параметри яких подані у табл. 3.

Таблиця 3 - Основні математичні моделі для розрахунків плити на вогнестійкість

| Фізичний процес | Використана математична модель (метод) | Джерело |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------|
| Теплотехнічна задача | | |
| Теплопровідність | Рівняння нестационарної теплопровідності, апроксимоване за допомогою МКЕ | [5] |
| Граничні умови | III роду | [5] |
| Фізична нелінійність | Ітеративний метод Ньютона-Рафсона | [5] |
| Статична задача | | |
| НДС | МКЕ | [5] |
| Пластичне деформування | Асоціативна теорія пластичного деформування фон Мізеса | [7] |
| Фізична та геометрична нелінійність | Ітеративний метод Ньютона-Рафсона | [7] |

При проведенні розрахунку були прийняті розрахункові схеми до теплотехнічної та статичної задач, що наведені на рис. 4. Дані розрахункові схеми визначені згідно із загальноприйнятим підходом.

Для завдання граничних умов були використані параметри, спираючись на європейський стандарт [3]. Величини вибраних параметрів наведені у табл. 4.

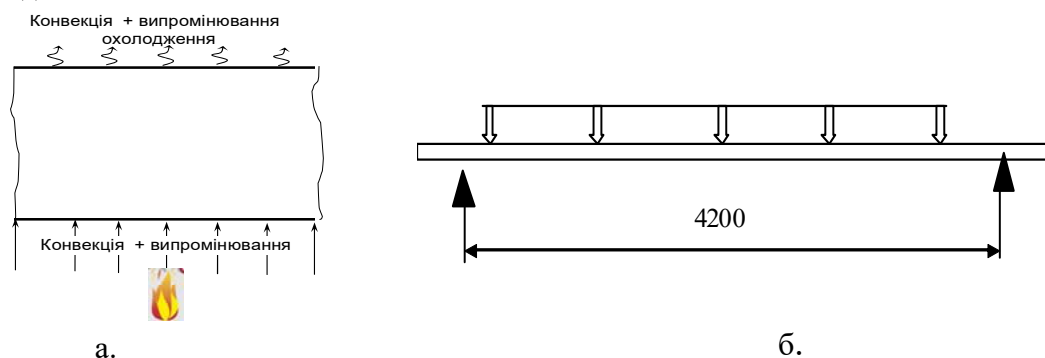


Рисунок 4 – Розрахункові схеми: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б)

Таблиця 4 - 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 ² ·К) | 25 | [4, 5] |
| Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні, що не обігривається | Вт/(м ² ·К) | 9 | [4, 5] |
| Ступінь чорноти | - | 0.8 | [4, 5] |
| Параметри граничних умов статичної задачі | | | |
| Діюче навантаження | кН/м ² | 1.5 | - |
| Коефіцієнт Пуассона | - | 0,2 | [4, 5] |

Для проведення розрахунку були побудовані сіткові моделі дерев'яної плити, вигляд яких поданий на рис. 5. При побудуванні сітко-

вих моделей для теплової задачі передбачалося 55 676 елементів, а для статичної задачі передбачалося 8 142 елементи.

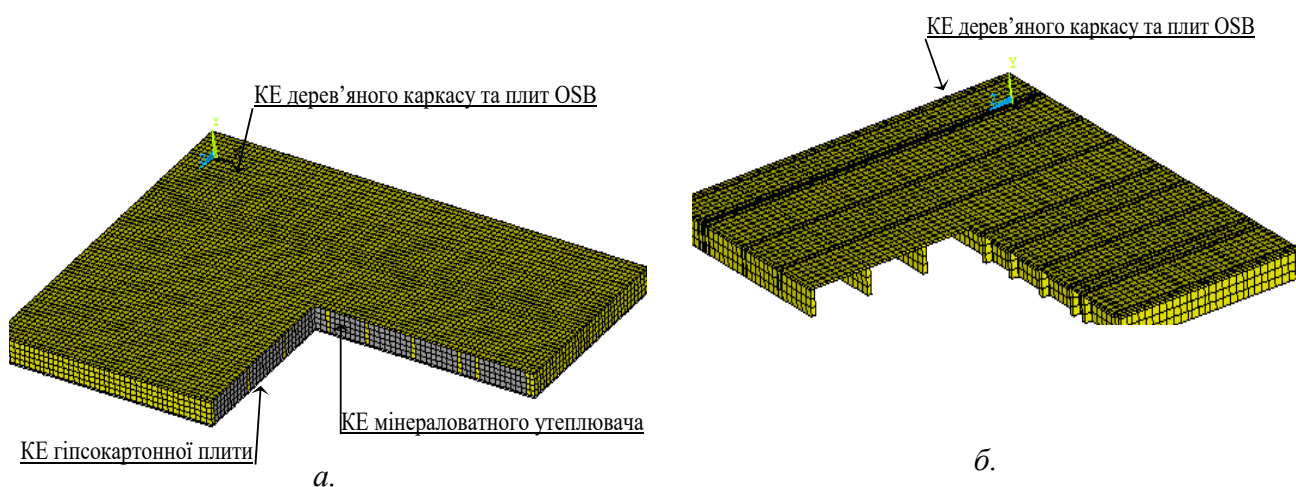


Рисунок 5 - Сіткові моделі: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б)

При побудуванні сіткових моделей було враховано, що сітка для вирішення теплової задачі відповідно до розрахункової схеми (див. рис. 4) є тривимірною. Сітка для статичної задачі повинна бути більш розрідженою і врахувати місцеву особливість більшого нагрівання внутрішніх шарів, прилеглих до обігрівної поверхні. Для переносу температурних значень у вузлові точки структурної задачі була використана лінійна інтерполяція.

З метою зменшення обсягу розрахунків розглядається симетрична половина плити при розв'язанні теплотехнічної задачі і симетрична

її чверть при розгляді міцнісної задачі. Робота вибраних фрагментів у складі всієї конструкції враховується за допомогою встановлення граничних умов симетрії по її боковій площині симетрії у теплотехнічній задачі і боковій та торцевій площинах симетрії у міцнісній задачі. 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. 6.

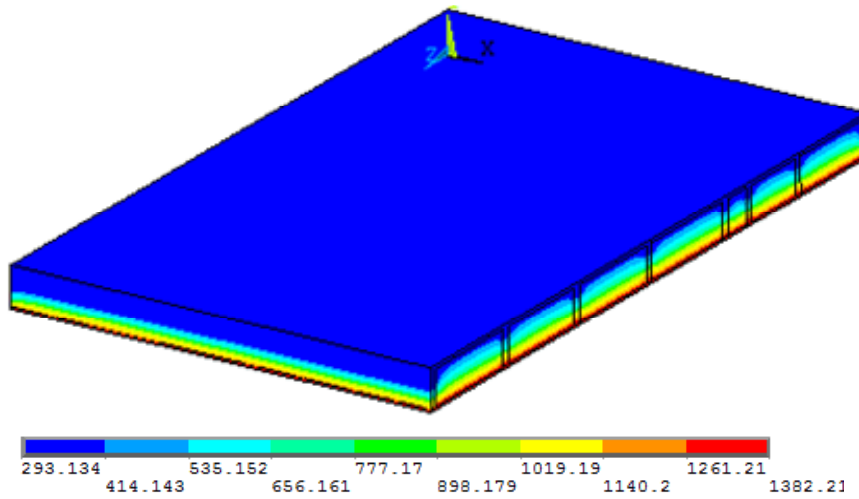


Рисунок 6 - Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі дерев'яної плити у момент часу 180 хв.

Після вирішення статичної задачі були отримані графіки максимального прогину дерев'яної плити та його швидкості наростання у

залежності від часу випробування. Отримані графіки наведені на рис. 7.

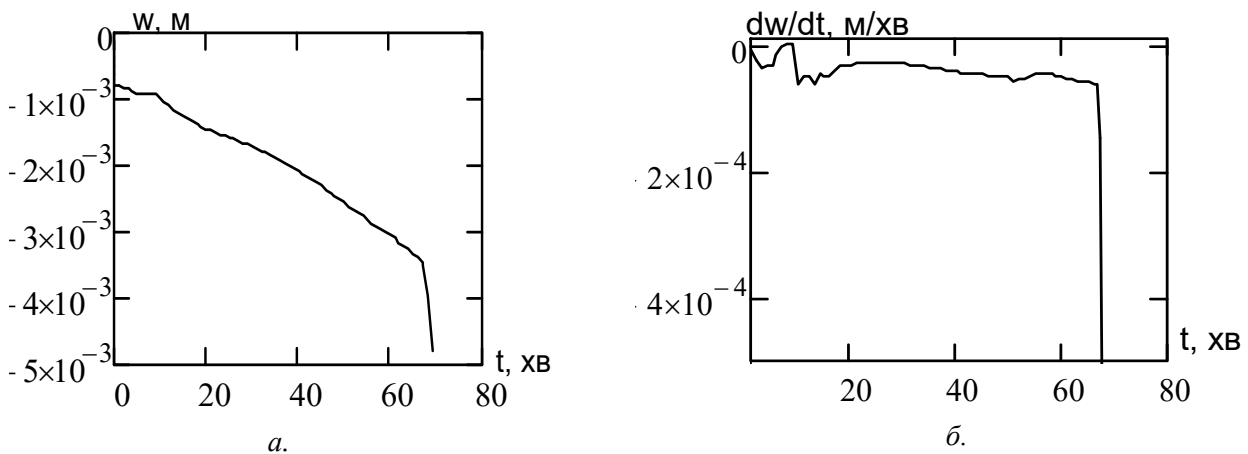


Рисунок 7 - Графік максимального прогину дерев'яної плити (а) та його швидкості наростання (б) у залежності від часу випробування

Згідно з отриманим графіком видно, що його можна розділити на декілька ділянок. Перша ділянка відповідає початковому навантаженню плити. Це ділянка майже вертикального стрибка на початку кривої. Наступна ділянка до 12 хв випробування помірного наростання прогину, коли нагрівання не спричиняє суттєвих деформацій дерев'яного каркаса. Після цього, до 68 хвилини іде більш інтенсивне нарощення прогину. Після цього деформації суттєво наростають і приводять до швидкої деструкції плити в умовах дії пожежі зі стандартним температурним режимом.

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b} = 197,76 \text{ мм}; \quad (1)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 \cdot b} = 8,79 \text{ мм/хв.}$$

Отримані графіки дозволяють отримати дані про настання граничного стану втрати несучої здатності шляхом порівняння поточних значень переміщень і швидкостей з гранично допустимими, що відповідно визначаються за формулами [2] де L – довжина плити між опорами, мм, а b – висота перерізу, мм.

Аналіз отриманих графіків показує, що за критеріями (1) граничний стан втрати несучої здатності не настає. Тим не менше, стрибкоподібне нарощування деформацій на 68 хв вказує на утворення пластичних шарнірів у елементах дерев'яного каркаса, що, у свою чергу, показує настання у даний момент втрати несучої здат-

ності. Аналіз температурних розподілів на рис. 6 та графіків на рис. 7 показує, що втрата несучої здатності настає на 68 хв пожежі із стандартним температурним режимом. Це означає, що клас вогнестійкості досліджуваної дерев'яної плити є не меншим за REI 60. Даний клас вогнестійкості є найбільшим з регламентованих [1].

Таким чином можна сформулювати основні положення методики визначення меж вогнестійкості дерев'яних плит.

1. Створюється кінцево-елементна модель теплопередачі у перекритті, з використанням рекомендацій стандарту [3].

2. Визначаються температурні розподіли у розрахунковій області.

3. Створюється кінцево-елементна модель для структурного аналізу, до вузлів якої прикладаються температури, що отримані при теплотехнічному аналізі.

4. При проведенні розрахунків аналізується максимальний прогин та швидкість його наростання і його значення порівнюється із даними величинами, що отримані за формулами (1).

5. При перевищенні критичних значень максимального прогину та швидкості його наростання вважається, що настає граничний стан втрати несучої здатності.

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

1. Виконані чисельні дослідження поведінки дерев'яної плити під час дії пожежі із стандартним температурним режимом.

2. Показано, що дерев'яна плита на певному часовому інтервалі зменшує свій максимальний прогин, після чого його значення стабілізується протягом майже 40 хв.

3. Показано, що наявність зменшення максимального прогину дерев'яної плити на певному часовому інтервалі і подальша його стабілізація зумовлена температурним розширенням нижніх шарів дерев'яних балок плити.

4. Виявлено, що наявність гіпсокартонної плити знизу перекриття, дозволяє істотно підвищити вогнестійкість даних плит за ознакою втрати несучої здатності до класу вогнестійкості REI 60.

5. Розроблені основні положення розрахункової методики оцінки вогнестійкості дерев'яних плит перекриттів на основі методу кінцевих елементів.

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.
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. EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures.-Part 1-2: General-Structural fire design. –, Brussels, 2004.
4. König J. and Walleig L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2: A design model for standard fire expose// Tratek, Rapport I 0001001.-Stocholm.–June 2000.
5. Collier P. C .R. and Buchanan A. H. Fire Resistance of Light-weight Timber Framed Walls/ Fire Technology, 38,125-145,2002.
6. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов, М.: НИИ строительной физики, 1972 – 142 с
7. Сахаров В.С. Метод конечных элементов в механике твердого тела / [Сахаров В.С., Кислокий В.Н., Киричевский В.Р. и др.]. – К. : Вища школа, 1982. – 480 с.

CALCULATION METHOD FOR EVALUATION OF THE FIRE RESISTANCE OF TIMBER SLABS, USING THE FINITE ELEMENTS METHOD

V. Demeshok

The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine

KEYWORDS

fire resistance, timber slabs, finite element method.

ANNOTATION

The article is described the researched results of behavior of timber slab in conditions of fire influence on it with standard curve "time-temperature", using the finite element method. On the basis of studies, the calculation method of evaluating the fire resistance of timber slabs has been developed, using database about strain-stress state of this slabs in conditions of fire influence.

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДЕРЕВЯННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.В. Демешок

Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

огнестойкость, деревянные плиты перекрытий, метод конечных элементов.

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследования поведения деревянной плиты в условиях влияния на нее пожара со стандартным температурным режимом с использованием метода конечных элементов. На основе проведенных исследований разработана и апробирована методика расчетов деревянных плит на огнестойкость на основе данных о напряженно-деформированном состоянии плиты под влиянием пожара.