

УДК 624.012

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ДЕРЕВ'ЯНОЇ ПЛИТИ ПРИ ПОЖЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДА КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

ПОЗДЕЄВ С. В.^{1*}, *д.т.н., проф.*,НЕКОРА О. В.², *к.т.н., с.н.с.*,ДЕМЕШОК В. В.³, *ад'юнкт*,МЕДВЕДЬ Б. Ю.⁴, *ад'юнкт*.

^{1*} Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна, 18000, тел. +38 (0472) 55-16-62, e-mail: svp_chipbbk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9085-0513.

² Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна, 18000, тел. +38 (0472) 55-16-62, e-mail: nekora_ov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5202-3285.

³ Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна, 18000, тел. +38 (0472) 55-16-62, e-mail: scorpionz@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7116-0034.

⁴ Департамент науки и образования Харьковской областной государственной администрации, г. Харьков, Украина, тел. +38 (0472) 55-16-62 e-mail: Master.kik@ukr.net.

Анотація. *Мета роботи* полягає у визначенні основних параметрів напружено-деформованого стану, схем деформування, розподілення дефектів, а також відомості щодо механізму та причин руйнування дерев'яних плит перекриттів під час пожежі при застосуванні методу кінцевих елементів. *Методика.* Для математичного моделювання поведінки дерев'яної плити в умовах пожежі використаний метод кінцевих елементів. При застосуванні методу кінцевих елементів застосовані надійні математичні моделі міцності та пластичності деревини, а також алгоритм вирішення нелінійних задач теплопровідності та міцності. *Результати.* Отримані відомості щодо параметрів напружено-деформованого стану та механізму руйнування дерев'яної плити перекриття в умовах впливу пожежі із стандартним температурним режимом. *Наукова новизна.* Показано, що дерев'яна плита на певному часовому інтервалі зменшує свій максимальний прогин після чого його значення стабілізується протягом майже 40 хв., показано, що наявність зменшення максимального прогину дерев'яної плити на певному часовому інтервалі і подальша його стабілізація зумовлена температурним розширенням нижніх шарів каркасу плити, виявлено, що наявність гіпсокартонної плити знизу перекриття, дозволяє істотно підвищити вогнестійкість даних плит за ознакою втрати несучої здатності до класу вогнестійкості REI 60. *Практична цінність.* Розроблена математична модель дерев'яної плити та отримані результати чисельного експерименту, який проведений із використанням даної математичної моделі, дозволяють розроблення алгоритмів розрахункових методів для проектування вогнестійких дерев'яних плит перекриттів

Ключові слова: дерев'яна плита перекриття; вогнестійкість; несуча здатність; математична модель; метод кінцевих елементів

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДЕРЕВЯННОЙ ПЛИТЫ ПРИ ПОЖАРЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ПОЗДЕЕВ С. В.^{1*}, *д.т.н., проф.*,НЕКОРА О. В.², *к.т.н., с.н.с.*,ДЕМЕШОК В. В.³, *ад'юнкт*,МЕДВЕДЬ Б. Ю.⁴, *ад'юнкт*.

^{1*} Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18000, тел. +38 (0472) 55-16-62, e-mail: svp_chipbbk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9085-0513.

² Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18000, тел. +38 (0472) 55-16-62, e-mail: nekora_ov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5202-3285.

³ Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18000, тел. +38 (0472) 55-16-62, e-mail: scorpionz@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7116-0034.

⁴ Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18000, тел. +38 (0472) 55-16-62, e-mail: Master.kik@ukr.net.

Аннотация. Цель работы состоит в определении основных параметров напряженно-деформированного состояния, схем деформирования, распределение дефектов, а также сведения о механизме и причинах разрушения деревянных плит перекрытий во время пожара при применении метода конечных элементов. **Методика.** Для математического моделирования поведения деревянной плиты в условиях пожара использован метод конечных элементов. При применении метода конечных элементов применены надежные математические модели прочности и пластичности древесины, а также алгоритм решения нелинейных задач теплопроводности и прочности. **Результаты.** Получены сведения о параметрах напряженно-деформированного состояния и механизма разрушения деревянной плиты перекрытия в условиях воздействия пожара со стандартным температурным режимом. **Научная новизна.** Показано, что деревянная плита на определенном временном интервале уменьшает свой максимальный прогиб после чего его значения стабилизируется на протяжении почти 40 мин., показано, что наличие уменьшения максимального прогиба деревянной плиты на определенном временном интервале и дальнейшая его стабилизация обусловлена температурным расширением нижних пластов каркаса плиты, выявлено, что наличие гипсокартонной плиты снизу перекрытия, позволяет существенным образом повысить огнестойкость данных плит за признаком потери несущей способности к классу огнестойкости REI 60. **Практическая значимость.** Разработанная математическая модель деревянной плиты и полученные результаты численного эксперимента, который проведен с использованием данной математической модели, позволяют разработку алгоритмов расчетных методов для проектирования огнестойких деревянных плит перекрытий

Ключевые слова: деревянная плита перекрытия; огнестойкость; несущая способность; математическая модель; метод конечных элементов

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR IN FIRE TIMBER FRAME WITH FINITE ELEMENT METHOD

POZDIEIEV S. V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NEKORA O. V.², *Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher.*,
DEMESHOK V. V.³, *adjunct*,
MEDVED B. Yu.⁴, *adjunct*.

^{1*} Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine, 18034 Cherkassy, Onoprienko Str., 8, phone +38 (0472) 55-16-62, e-mail: svp_chipbbk@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9085-0513.

² Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine, 18034 Cherkassy, Onoprienko Str., 8, phone +38 (0472) 55-16-62, e-mail: nekora_ov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5202-3285.

³ Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine, 18034 Cherkassy, Onoprienko Str., 8, phone +38 (0472) 55-16-62, e-mail: scorpionz@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7116-0034.

⁴ Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine, 18034 Cherkassy, Onoprienko Str., 8, phone +38 (0472) 55-16-62, e-mail: Master.kik@ukr.net.

Abstract. Purpose. The aim of the work is to define the basic parameters of the stress-strain state of deformation schemes, the distribution of defects, as well as information on the mechanism and causes destruction of timber frames during a fire in the application of the finite element method. **Methods.** For the mathematical modeling of the behavior of the timber frames in a fire, use the finite element method. When applying the finite element method using a reliable mathematical models of strength and ductility wood and algorithm for solving nonlinear problems of heat conduction and strength results. Obtained information about the parameters of the stress-strain state and the destruction of timber frames overlap mechanism under fire exposure to the standard temperature conditions. **Scientific novelty.** It is shown that the timber frame at a certain time interval reduces its maximum deflection and then its value has stabilized for about 40 min., Showing that the presence of reducing the maximum deflection of the timber frame at a certain time interval and its further stabilization is due to thermal expansion of the lower layers of the plate frame, It revealed that the presence of plasterboard ceiling from below, allows significantly improves the fire resistance data frames for signs of loss of load-carrying capacity to the fire resistance class REI 60. **The practical significance.** The developed mathematical model of the timber frames and the results of the numerical experiment, which is held using this mathematical model allows the development of algorithms of calculation methods for the design of fire-resistant timber frame

Keywords: industrial facility; explosion pressure; hazards; mathematical simulation; shock tube; closed volume; gas explosion

Постановка проблеми

Останнього часу для зведення будівель, у тому числі 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, 2]. 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 вогнестійкості

тійких будівельних конструкцій застосовуються розрахункові методи. У даний час теоретична та методична база щодо такого підходу міститься у серії нормативних документів [3], чинних 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. 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 методик 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 важких 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 дуже точно описати поведінку дерев'яних плит перекриттів в умовах пожежі. Отримані математичні моделі у даних 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 від-

мінність 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.

Мета роботи

Мета полягає у визначенні основних параметрів напружено-деформованого стану, схем деформування, розподілення дефектів, а також відомості щодо механізму та причин руйнування дерев'яних плит перекриттів під час пожежі при застосуванні методу кінцевих елементів.

Викладення основного матеріалу досліджень

На рис. 1 подана схема конструктивних елементів дерев'яної плити, що розглядається.

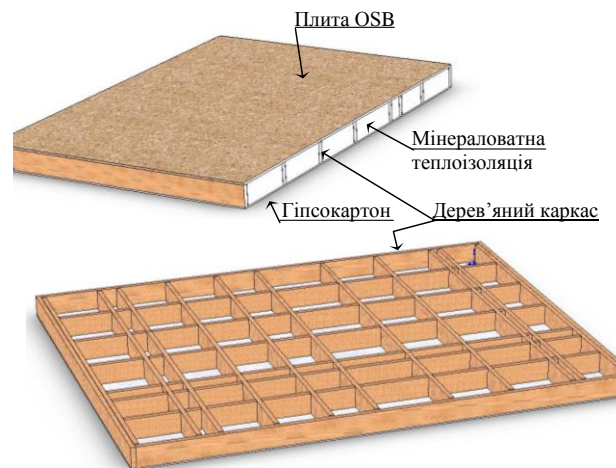


Рис. 1. Конструктивна схема дерев'яної плити / Construction scheme of wooden a plate

Для вивчення поведінки дерев'яної плити перекриття була прийняті такі її основні технічні параметри, які наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Основні параметри сталезалізобетонної плити / The main parameters of steel reinforced concrete slab

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

Для описання поведінки дерев'яної плити 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 повністю відповідають положенням, сформульованим у роботі [6].

Для розв'язку поставленої задачі необхідне завдання комплексу початкових даних, до яких відно-

сяться властивості компонентів матеріалу дерев'яної плити, параметри граничних умов, що враховують прикладенні навантаження, та теплову дію. На рис. 2 наведені теплофізичні характеристики деревини каркасу плити, що описані у чинному стандарті України [3] щодо розрахунку дерев'яних 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].

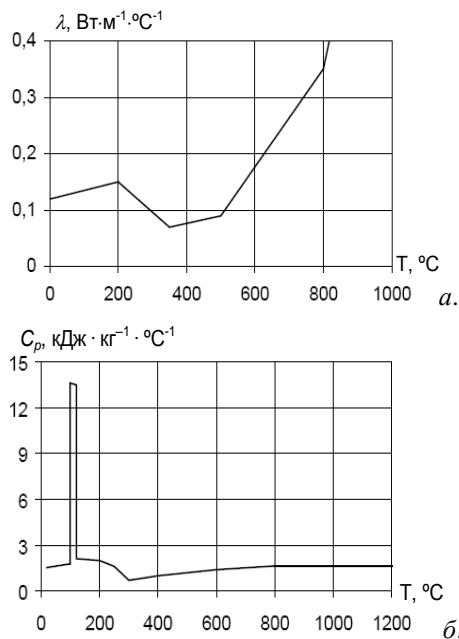


Рис. 2. Теплофізичні характеристики деревини: коефіцієнт теплопровідності (а); питома теплоємність (б) / Thermal properties of wood: the thermal conductivity (а); specific heat (b)

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

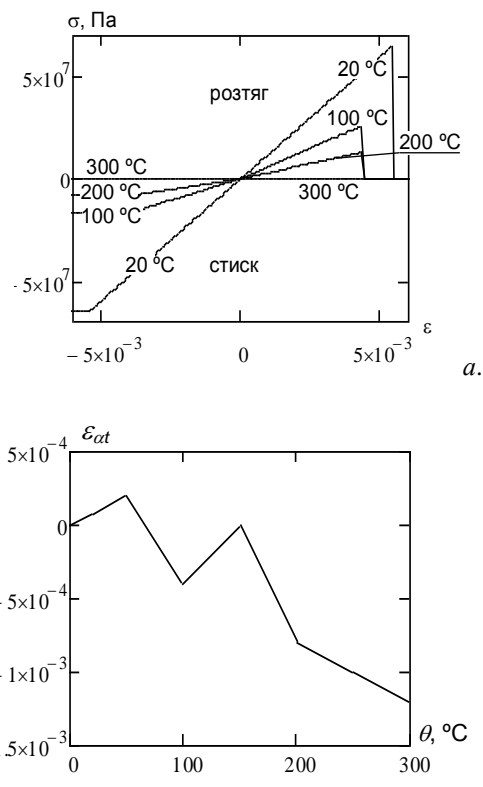


Рис. 3. Діаграми деформування деревини при різних температурах нагріву (а) та температурної деформації розширення деревини (б) / Chart deformation of wood at different temperatures heating (а) and thermal expansion deformation of wood (b)

Використані характеристики відповідають вимогам стандарту України [3]. 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 проведення розрахунку були використані математичні моделі, параметри яких подані у табл. 2.

Таблиця 2

Основні математичні моделі для розрахунків плити на вогнестійкість / Basic mathematical models for calculation of fire resistance plate

Особливість поведінки матеріалу стіни	Використана математична модель (метод)	Дж-ло
Теплотехнічна задача		
Теплопровідність	Рівняння нестационарної теплопровідності разом з 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]
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 чинні стандарти України щодо розрахунку будівельних конструкцій на вогнестійкість. Величини вибраних параметрів наведені у табл. 3.

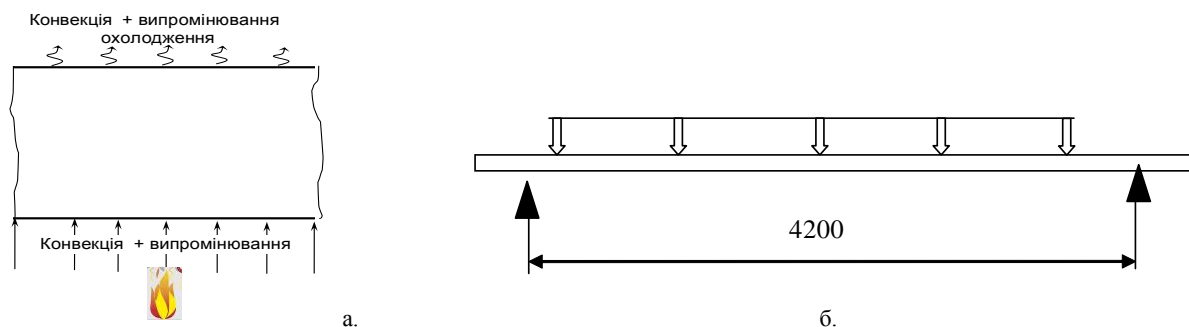


Рис. 4. Розрахункові схеми: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б) / The scheme calculation: the problem of heating (a); static problem (b)

Таблиця 3

Параметри граничних умов / Options boundary conditions

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]
Постійна Стефана-Больцмана	Вт/(м ² ·К ⁴)	5,67·10 ⁻⁸	[4, 5]
Параметри граничних умов статичної задачі			
Діюче навантаження	кН/м ²	1,5	-
Коефіцієнт Пуасона	-	0,2	[4, 5]

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

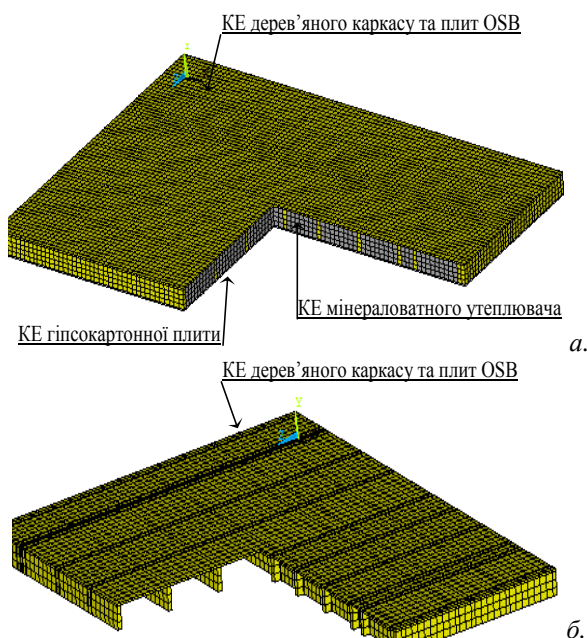


Рис. 5. Сіткові моделі: до теплотехнічної задачі (а); до статичної задачі (б) / Mesh models: the problem of heating (a); static problem (b).

При побудованні сіткових моделей було враховано, що сітка для вирішення теплової задачі відповід-

но до розрахункової схеми (див. рис. 3) є одномірною і повинна бути набагато гущішою. Сітка для статичної задачі повинна бути більш грубою і враховувати місцеву особливість більшого нагрівання внутрішніх шарів, прилеглих до обігрівної поверхні. Для переносу температурних значень у вузлові точки міцнісної задачі була використана лінійна інтерполяція.

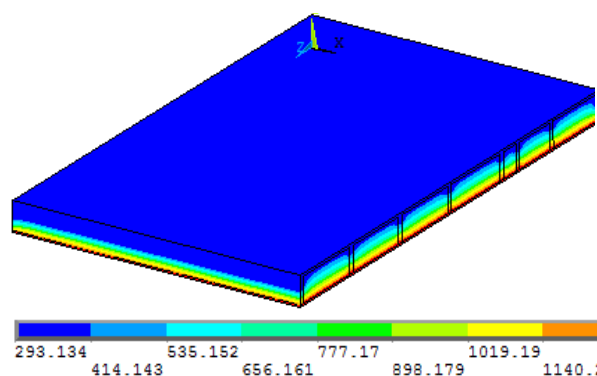


Рис. 6. Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі дерев'яної плити у момент часу 180 хв. / Results solve the problem of heating: temperature distribution in a section of wooden boards at time 180 minutes.

З метою зменшення обсягу розрахунків розглядається симетрична половина плити при розв'язку 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.

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.

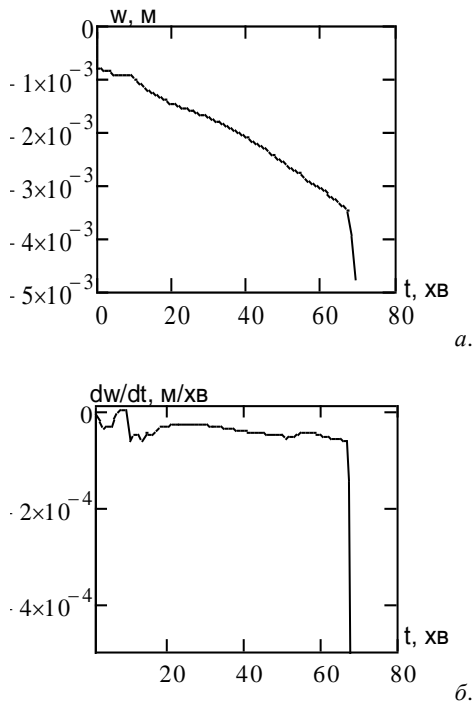


Рис. 7. Графік максимального прогину дерев'яної плити (а) та його швидкості наростання (б) у залежності від часу випробування / Graph a maximum deflection of wooden panels (a) and its rate of rise (b) depending on the time trial.

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 каркасу. Після цього до 68 хвилини іде більш інтенсивне нарощення прогину. Після цього деформації суттєво

наростають і приводять до швидкої деструкції плити в умовах стандартного випробування на вогнестійкість.

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, 3]:

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

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000 \cdot b} = 8,79 \text{ мм/хв.} \quad (1)$$

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 каркасу, що у свою чергу показує настання у даний момент втрати несучої здатності. Аналіз рис. 7 показує, що стан втрати теплоізоляційної здатності не настає. Це означає, що клас вогнестійкості досліджуваної дерев'яної плити є не меншим за REI 60. Даний клас вогнестійкості є найбільшим з регламентованих стандартом [1].

Висновки

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

1. Виконане чисельне 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 каркасу 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. 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 Resistanceof Light-weight Timber Framed Walls/ Fire Technology, 38,125-145, 2002.
6. Милованов, А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций [Текст] / А.Ф. Милованов; Москва: Стройиздат, 1986. – 224 с.
7. Сахаров, В. С. Метод конечных элементов в механике твердого тела [Текст] / В. С. Сахаров, В. Н. Кислокий, В. Р. Киричевский и др. – Киев: Вища школа, 1982. – 480 с.

REFERENCES

1. Zahist od Pozhezhi. Pozhezhna bezpeka obyektiv budivnitstva. DBN V.1.1-7-2002 [Chinny od 01.05.2003.]. - К .: Vidavnistvo "Libra", 2003. - 87 - (Natsionalny Ukraine Standard). (in Ukrainian)
2. Budivelni konstruksii. Metodi viprobuvan na vognestiykist. Zagalni vimogi. Pozhezhna bezpeka. (ISO 834: 1975) DSTU B V.1.1-4-98 *. [Chinny od 10.28.1998.] - К .: Ukrarhbudinform, 2005. - 20 - (Natsionalny Ukraine Standard). (in Ukrainian)
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 Resistanceof Light-weight Timber Framed Walls/ Fire Technology, 38,125-145, 2002.
6. Milovanov A. F. *Ognestoykost zhelezobetonnyih konstruksiy* [Fire resistance of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat, 1986. - 224 p. (in Russian)
7. Sakharov V. S. *Metod konechnyih elementov v mehanike tverdogo tela* [Finite element method in solid mechanics] / [Sakharov V. S., Kislooky V. N., Kirichevskogo V. R. et al.]. - Kiev: Vishcha School, 1982. - 480 p. (in Russian).

Статья поступила в редколлегию 6.09.2016