

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**ПЕЛЕХ АНДРІЙ БОГДАНОВИЧ**

УДК 624.011.14+624.046+ 624.044

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ СТИСНУТИХ**  
**ДЕРЕВ'ЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ ВПЛИВІ ВИСОКИХ**  
**ТЕМПЕРАТУР**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

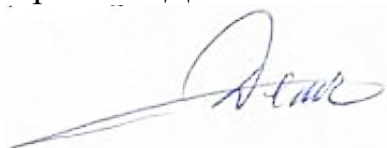
Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



А.Б. Пелех

Науковий керівник Демчина Богдан Григорович, доктор технічних наук,  
професор



Львів – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Пелех А.Б.* «Несуча здатність та деформативність стиснутих дерев'яних елементів при локальному впливі високих температур» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 5.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство розвитку громад та територій України, Львів, 2021.

Дисертація присвячена експериментальним та теоретичним дослідженням напружено-деформованому стану стиснутих дощатоклеєних колон при локальному впливі високих температур. Дослідні зразки відрізнялись ступенем вогнезахисту. Розроблено практичні рекомендації із розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон, що працюють в умовах локальної дії високих температур.

У *першому розділі* проведено аналіз існуючих експериментальних досліджень дерев'яних конструкцій при дії високих температур. Особливу увагу приділено методам розрахунку стиснутих пошкоджених дерев'яних елементів. Встановлено, що питання вогнестійкості та роботи дерев'яних конструкцій при локальній дії високих температур не є повністю розкритим та потребує додаткових досліджень.

Виявлено недоліки існуючих підходів щодо вирішення проблеми розрахунку дерев'яних колон, в умовах дії високих температур у нормативній та технічній літературі.

Після аналізу існуючих досліджень виявлено необхідність в подальшому виконанні експериментальних досліджень стиснутих осьовим навантаженням при дії локального нагріву. Виникає необхідність детально вивчити процес втрати несучої здатності та стійкості таких елементів. Аналіз досліджень та технічної літератури за тематикою роботи дерев'яних конструкцій в умовах пожежі дозволив окреслити основні напрямки наукових досліджень та сформулювати основні задачі дисертаційної роботи.

У *другому розділі* подано об'єм та методику експериментальних досліджень. Описано методику визначення характеристик дерев'яних конструкцій згідно діючих нормативних документів. Для дослідження механічних характеристик деревини на стиск, розтяг та згин були виконані випробування зразків згідно діючих норм.

Описано методику випробування на центральний стиск колон за нормальної температури. Для дослідження були виконані дощатоклеєні колони розміром 100x100x1000(h) мм із дошок перерізом 25x100 мм. Дослідний зразок на центральний стиск випробовували на дослідному стенді, який забезпечував шарнірне обпирання кінців колони. Навантаження прикладалось ступенями по 10 кН із витримкою 5 хв. Вимірювання відносних деформацій виконувалось за допомогою мікроіндикаторів, деформація вигину – за допомогою прогиномірів Аістова.

Для дослідження колони на центральний стиск при локальній дії високої температури було виготовлено ідентичні колони до тих, які досліджувались на центральний стиск із тією різницею, що всередину перерізу, в зоні горіння, були вмонтовані термопари. Локальний нагрів здійснювався за допомогою муфельної печі, що попередньо нагрівалася до температури 500<sup>0</sup>С-550<sup>0</sup>С, яка через спеціально виготовлений перехідник контактувала ззовні з боковою поверхнею колони. Для експерименту було виготовлено дві серії колон: без додаткового вогнезахисту та з додатковим термозахистом з гіпсокартонних листів товщиною 12,5мм.

Для дослідження умов роботи дерев'яних конструкцій в умовах реальної пожежі із застосуванням систем вогнезахисту з гіпсокартонних листів, була виготовлена дерев'яна рама, яка складалася з балки прольотом 2,6 м та двох стійок висотою 2,5м і виготовлена з клеєного дерев'яного бруса перерізом 16×18 см. Матеріал бруса – клеєна деревина з соснових брусків поперечним перерізом 3×5см, щільністю 510 кг/м<sup>3</sup> та вологістю 15%.

У *третьому розділі* подано результати досліджень серій дослідних зразків для визначення механічних властивостей деревини на стиск, розтяг та

згин. За результатами досліджень деревини на міцність було встановлено середнє значення міцності деревини на стиск вздовж волокон – 35,40 Н/мм<sup>2</sup>, середнє значення міцності деревини на розтяг вздовж волокон – 79,3 Н/мм<sup>2</sup>, та середнє значення модуля пружності деревини на розтяг вздовж волокон – 13800 Н/мм<sup>2</sup>, а також середнє значення міцності деревини на згин – 65 Н/мм<sup>2</sup>.

Отримано та проаналізовано результати випробовування дерев'яних дощатоклеєних колон на стиск при дії нормальних температур. Встановлено руйнівні зусилля для п'яти колон, а також досліджено напружено-деформований стан колон в процесі завантаження та перед самим руйнуванням. Визначено, що деформації мають пружний характер практично до моменту руйнування колони.

За результатами випробувань 5 та 6 серій отримано та проаналізовано дослідження міцності та деформативності стиснутих дерев'яних колон на дію локального нагріву без захисту та з захистом зони нагріву гіпсокартонними листами. Була визначена глибина обвуглювання незахищеної деревини в момент руйнування, у середньому вона становила 20 мм, та швидкість обвуглювання деревини. Такі ж результати отримано для колон із додатковим вогнезахистом у вигляді гіпсокартонних листів. Для захищених колон глибина обвуглювання становила у середньому 11 мм. За результатами випробувань був встановлений час випробувань, який при забезпеченні умов стандартної кривої пожежі може вважатися межею вогнестійкості визначеної в лабораторних умовах.

Опрацьовано результати дослідження натурального випробовування дерев'яної рами в умовах реальної пожежі. Проаналізовано роботу конструкцій на різних етапах пожежі. Отримано результати обвуглювання в реальних умовах, що є меншими за нормативні значення.

*У четвертому розділі* виконаний розрахунок дерев'яних колон на дію зовнішнього температурного навантаження. Отримано аналітичний розв'язок задачі з розподілу температури в дерев'яній колоні, частина якої знаходиться в змінному (в часі) температурному полі.

Проаналізовано вплив нагрівання на фізико-механічні властивості дерев'яних колон за допомогою математичних методів. Отримано аналітичний розв'язок задачі про розподіл міцності деревини на стиск, розтяг та зріз в тілі нерівномірно, односторонньо нагрітої дерев'яної колони

Виконаний розрахунок напружено-деформованого стану дерев'яних колон під час локального високотемпературного впливу та зовнішнього навантаження. Під час виконання розрахунку були оцінені наступні фактори: силове навантаження, силове навантаження і температурне розширення, силове навантаження зі зміною властивостей деревини, силове навантаження і зміни геометричного перерізу внаслідок вигорання.

Виконаний практичний розрахунок центрально стиснутої колони із локальним тепловим впливом методом скінчених елементів у програмному комплексі «ЛІРА». Також виконано порівняння отриманих результатів із результатами, обчисленими за сучасними нормативними документами.

Наведено рекомендації для розрахунку дерев'яних колон при їх локальному вогневому впливі.

**Ключові слова:** межа вогнестійкості, високотемпературний локальний нагрів, критичний вигин, дерев'яні дощатоклеєні колони, дія високої температури, дерев'яні конструкції.

## ABSTRACT

*Pelekh A.B.* "Bearing capacity and deformability of compressed wooden elements under the local influence of high temperatures" - Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) on the specialty 5.23.01 - building structures, buildings and constructions. - National University "Lviv Polytechnic", Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, Lviv, 2021.

The thesis is devoted to experimental and theoretical studies of the stress-strain state of compressed laminated columns under local exposure to high temperatures. The test specimens were distinguished by the degree of fire protection. Practical recommendations for calculating the load-carrying capacity of compressed boarded laminated columns working in conditions of local action of high temperatures have been developed.

*The first chapter* reviews the existing experimental studies of wooden structures under the influence of high temperatures. Particular attention is paid to methods of calculation of compressed damaged wooden elements. It is found that the issue of fire resistance and operation of wooden structures under local exposure to high temperatures is not fully disclosed and requires additional research.

Identified the shortcomings of the existing approaches to solving the problem of calculation of wooden columns, in conditions of high temperatures in the normative and technical literature.

After analyzing the existing studies, the need for further experimental studies of compressed axial loads under the action of local heating is revealed. There is a need to study in detail the process of loss of bearing capacity and stability of such elements. Analysis of research and technical literature about wooden structures in fire conditions allowed to determine the main directions of scientific research and to form the main tasks of the dissertation work.

*The second chapter* presents the scope and methodology of the experimental research. The method of determining the characteristics of wooden structures

according to the current regulatory documents is described. To investigate the mechanical characteristics of wood in compression, tension, and bending tests were carried out on samples according to current regulations.

The methodology of central compression testing of columns at temperature is described. For the study, there were made planking of the columns of size 100x100x1000 (h) mm, with planks of section 25x100 mm. The experimental sample on the central compression was tested on the experimental stand, which provided hinged support of the ends of the column. The load was applied in steps of 10 kN with an exposure time of 5 min. Relative strains were measured using microindicators, the bending strain was measured using the Aistov deflectometer.

To study the columns for central compression at local exposure to high temperature was made identical columns to be those that were studied for central compression with the difference that in the middle of the section, in the burning zone, were mounted thermocouples. Local heating was carried out with the help of a muffle stove preheated to 500<sup>0</sup>C-550<sup>0</sup>C, which through a specially made adapter was in contact with the side surface of the column from the outside. For the experiment, two series of columns without additional flame retardant and with additional thermal protection from gypsum board sheets of thickness 12.5 mm were made.

To study the conditions of wooden structures in a real fire with the use of fire protection systems with gypsum plasterboard sheets, a wooden frame consisting of a beam spanning 2.6 m and two posts 2.5 m high was made of a laminated wooden bar with a section of 16×18 cm. The material of the beam is glued pine timber of 3×5 cm section, density 510 kg/m<sup>3</sup>, and humidity of 15%.

*The third chapter* presents the results of studies of a series of test samples to determine the mechanical properties of wood in compression, tension, and bending. According to the results of wood strength tests, the average value of compression strength of wood along the fibers - 35.40 N/mm<sup>2</sup>, the average value of tensile strength of wood along the fibers - 79.3 N/mm<sup>2</sup>, and the average value of modulus

of elasticity of wood on tension along the fibers -  $13800 \text{ N/mm}^2$ , and the average value of bending strength of wood -  $65 \text{ N/mm}^2$  were established.

The results of compression tests of the laminated wooden columns under the action of normal temperatures have been obtained and analyzed. Destructive forces for five columns have been established, and the stress-strain state of columns during loading and just before destruction has been investigated. It is determined that the deformations have elastic character practically up to the moment of column failure.

According to the results of tests of 5 and 6 series, studies of strength and deformability of compressed wooden columns on the action of local heating without protection and with the protection of the heating zone with plasterboard sheets were obtained and analyzed. The depth of charring of unprotected wood at the time of failure was determined, on average it was 20 mm, and the rate of charring of wood. The same results were obtained for columns with additional fire protection in the form of gypsum board sheets. For protected columns, the depth of charring averaged 11 mm. Based on the test results, a test time was established, which under the conditions of the standard fire curve can be considered as the fire resistance limit determined under laboratory conditions.

The results of a full-scale test of a wooden frame under conditions of a real fire are processed. The performance of the structures at different stages of the fire was analyzed. Obtained the results of charring under real conditions, is less than the normative values.

*In the fourth chapter*, the calculation of wooden columns for the influence of external temperature load is carried out. An analytical solution of the problem of temperature distribution in a wooden column, part of which is in a variable in time temperature field, is obtained.

The effect of heating on the physical and mechanical properties of wooden columns is analyzed using mathematical methods. The analytical solution of the problem of distribution of compressive, tensile, and shear strength of wood in the body of an unevenly, unilaterally heated wooden column has been obtained.



The calculation of the stress-strain state of wooden columns during local high-temperature action and external load has been performed. During the calculation, the following factors were evaluated: force load, force load and thermal expansion, force load with changes in wood properties, force load, and geometric cross-section changes due to burn-in.

The practical calculation of a centrally compressed column with a local thermal influence by the finite element method in the program complex "Lira" has been carried out. The results obtained are compared with the results calculated according to the modern normative documents.

The recommendations for the calculation of wooden columns under their local fire action are given.

**Key words:** fire resistance limit, high-temperature local heating, critical bending, wooden laminated columns, high-temperature action, wooden structures.

*Список публікацій здобувача за темою дисертації:*

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Дослідження вогнестійкості металевих елементів, захищених гіпсокартонними листами / А. Б. Пелех, Б. Г. Демчина, Р. М. Світий, В. С. Фіцик. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2004. № 520 : Теорія і практика будівництва. С. 213–217.

2. Натурні випробування конструкції дерев'яної рами на вогнестійкість в умовах реальної пожежі / А. Б. Пелех, Б. Г. Демчина, Т. М. Шналь, С. С. Була, О. В. Крочак. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2008. № 627 : Теорія і практика будівництва. С. 167–172.

3. Поведінка дощатоклесних колон при місцевому впливі високої температури / Б. Г. Демчина, А. Б. Пелех, Г. М. Олексин, М. І. Сурмай. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009. № 655 : Теорія і практика будівництва. С. 71–74.

4. Особливості розподілу температури у залізобетонному перерізі при дії місцевого нагріву / С. С. Була, А. Б. Пелех, О. М. Бадло, П. О. Лесюк, Б. І. Мальків. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2009.

5. Демчина Б. Г., Сурмай М. І., Пелех А. Б. Підходи до визначення критеріїв меж вогнестійкості вертикальних конструкцій. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2010. № 662 : Теорія і практика будівництва. С. 155–160.

6. Пелех А.Б., Сурмай М. І., Олексин Г.М. Зниження міцності дерев'яних дощатоклеєних конструкцій внаслідок дії високих температур. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Макіївка, 2010. Вип. 5 (85) : Сучасні будівельні матеріали, конструкції та інноваційні технології зведення будівель і споруд, т. 2. С.268–274.

***Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:***

1. Пелех А. Напружено деформований стан дерев'яних колон при нерівномірному локальному нагріві Stress-strain state of wooden columns under uneven local heating // Intellectual Archive. 2020. Vol. 9, № 3. P. 196–203.

***Публікації, що додатково відображають результати дисертаційного дослідження:***

1. Пат. № 64102 UA, МПК: G01N 33/46, G01N 3/08 Пристрій для визначення питомого опору висмикуванню сталевих нагелів з деревини. /Демчина Х.Б., Сурмай М.І., Пелех А.Б., Демчина Б.Г. Опубліковано: 25.10.2011

2. Пат. № 49549 UA, МПК: F23M 5/00, Піч для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій та окремих вузлів їх стикових сполучень /Фіцик В.С., Пелех А.Б., Демчина Б.Г., Половко А.П., Демчина Х.Б. Опубліковано: 26.04.2010

3. Пат. № UA, МПК: F23M 5/00, Піч для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій та окремих

вузлів їх стикових з'єднань / Демчина Б.Г., Фіцик В.С., Пелех А.Б., Половко А.П. Опубліковано: 15.09.2006

***Відомості про апробацію результатів дисертації:***

Основні матеріали дисертації доповідалися і отримали схвалення на науково-технічних конференціях, зокрема: на міжнародному симпозиумі «Сучасні металеві та дерев'яні конструкції (нормування, проектування та будівництво) в м. Брест, 15-18 червня 2009р., шостій всеукраїнській науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» (м. Одеса, 2011р.) та на наукових семінарах та конференціях кафедр „Мости та будівельна механіка” і «Будівельні конструкції та мости» Національного університету ”Львівська політехніка” у 2006-2015 рр.

## ЗМІСТ

### ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ABSTRACT .....	6
ЗМІСТ .....	12
ВСТУП .....	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ У ГАЛУЗІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	19
1.1. ОСНОВНІ ВИМОГИ ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ У СУЧАСНИХ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТАХ. ....	21
1.1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕРЕВИНИ, ЯК БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ .....	21
1.1.2. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ДЕРЕВИНУ .....	28
1.1.3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТИСНУТО-ЗІГНУТИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	32
1.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВИНИ.....	35
1.3. МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ ГОРІННЯ.....	46
1.3.1. РІВНЯННЯ РІВНОВАГИ І СТАНУ РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩ, ЩО ДОЗВОЛЯЮТЬ ПРОГНОЗУВАТИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН. ГРАНИЧНІ І ПОЧАТКОВІ УМОВИ. ....	46
1.3.2. РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ. ПОЧАТКОВІ І ГРАНИЧНІ УМОВИ. МЕТОДИ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РІТЦА. ....	52
1.4. ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1.....	59
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄМ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	62
2.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ ПРИ НОРМАЛЬНІЙ ТЕМПЕРАТУРІ .....	65
2.1.1 ВИПРОБУВАННЯ І СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА СТИСК... ..	65
2.1.2 ВИПРОБУВАННЯ ІІ СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА РОЗТЯГ .....	67
2.1.3 ВИПРОБУВАННЯ ІІІ СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА ЗГИН.... ..	69

2.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВАННІ. ....	73
2.4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ІЗ ЗАХИСТОМ ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВІ.....	78
2.5. НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДЕРЕВ'ЯНОЇ РАМИ В УМОВАХ РЕАЛЬНОЇ ПОЖЕЖІ. ....	79
2.6. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ .....	81
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	83
3.1. РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕРЕВИНИ .....	83
3.1.1. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ І СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА СТИСК.....	83
3.1.2. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ ІІ СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА РОЗТЯГ .....	84
3.1.3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ ІІІ СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА ЗГИН.....	86
3.2. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН НА СТИСК ПРИ ДІЇ НОРМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ .....	87
3.3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН БЕЗ ЗАХИСТУ ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВАННІ.....	92
3.4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ІЗ ЗАХИСТОМ ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВІ.....	97
3.5. РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНОГО ВИПРОБУВАННЯ В УМОВАХ РЕАЛЬНОЇ ПОЖЕЖІ .....	101
3.6. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	106
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗВ'ЯЗКИ ЗАДАЧ НЕРІВНОМІРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ .....	107
4.1. ВПЛИВ ЛОКАЛЬНОГО НАГРІВУ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН .....	107
4.2. ВПЛИВ НАГРІВАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕРЕВИНИ КОЛОН .....	110

4.1. РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПІД ЧАС ЛОКАЛЬНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ ТА ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	116
4.4. ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКОВИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПІД ЧАС ЇХНЬОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЛОКАЛЬНОГО НАГРІВУ ....	123
4.5. ПРАКТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ ВОГНЕВОМУ ВПЛИВІ.....	127
4.5.1. РОЗРАХУНОК МЕТОДАМИ ОПИСАНИМИ В НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТАХ .....	128
4.5.2. РОЗРАХУНОК МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕМЕЛЕНТІВ .....	133
4.6. РЕКОМЕНДАЦІЇ З РОЗРАХУНКУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ ВОГНЕВОМУ ВПЛИВІ.....	135
4.7. ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 4.....	144
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147
ДОДАТОК А. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ .....	158
ДОДАТОК Б. РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В ТІЛІ ДЕРЕВ'ЯНОЇ КОЛОНИ ДЛЯ ВИПАДКУ ОДНОВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ .....	164
ДОДАТОК В. РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В ДЕРЕВ'ЯНІЙ КОЛОНИ З ВОГНЕЗА-ХИСТОМ ДЛЯ ВИПАДКУ ОДНОВИМІРНИХ ЗАДАЧ .....	167
ДОДАТОК Д. АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ .....	174

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Деревина, як будівельний матеріал, століттями використовується для зведення будівель і споруд. Довгий час у дерев'яних конструкціях використовувалася цільна деревина, що обмежувало можливості перекриття великих прольотів будівель. Поява клеєних дерев'яних конструкцій усунуло значну частину природних недоліків деревини (неоднорідність, наявність сучків, вплив вологості), відповідно підвищилася надійність конструкцій, оскільки клеєна деревина володіє більш стабільними механічними властивостями.

Незважаючи на пожежну небезпеку, деревина широко використовується в сучасному будівництві. Невелика теплопровідність деревини, її масивність і цілісність перерізів дає можливість дерев'яним конструкціям зберігати несучу здатність при пожежі набагато довше, ніж металевим, які втрачають її при температурі 450-500°C. Основною причиною руйнування дерев'яних конструкцій при пожежі є обвуглювання деревини, що призводить до зменшення їх перетинів. Протягом пожежі навантаження сприймається необвугленою частиною перетину, і несуча здатність зменшується в результаті зменшення площі перетину. Відповідно на межу вогнестійкості конструкції впливає швидкість обвуглювання деревини. На межу вогнестійкості також впливає зміна міцності та деформативності деревини при її нагріванні в діапазоні температур 20-300°C.

Межу вогнестійкості дерев'яних конструкцій можна визначити методом випробувань або розрахувати теоретично. Дослідження дерев'яних конструкцій на вогнестійкість досить складні та вимагають значних фінансових затрат, крім того, в процесі випробувань складно визначити характеристики міцності і деформативності перерізу через високі температури в випробувальних печах. Пропонований метод випробування центрально-стиснутих дерев'яних елементів достатньо простий та недорогий, дозволяє досліджувати напружено-деформований стан конструкції без використання великих випробувальних печей і може бути використаний для визначення

вогнестійкості невеликих елементів конструкції. Метод заснований на припущенні, що межа вогнестійкості настає в момент досягнення граничних напружень в найбільш ослабленому перерізі елемента конструкції і залежить від швидкості обвуглювання деревини.

**Зв'язок теми дисертації з директивними документами та науковими програмами.** Робота є ініціативним дослідженням в актуальному напрямі наукових досліджень, яка відповідає науковому напрямку кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи «Теоретичні та експериментальні дослідження звичайних та попередньо напружених залізобетонних, металевих, дерев'яних та інших конструкцій будівель, споруд, мостів і фундаментів та методів їх підсилення» (номер державної реєстрації 0117U007366, замовник – Міністерство освіти і науки України, 2017-2022рр.).

**Мета роботи** - дослідити напружено-деформований стан, розробити рекомендації щодо розрахунку стиснутих дощатоклеєних колон при локальному впливі високих температур.

**Задачі досліджень:**

- розробити методіку експериментальних досліджень напружено-деформованого стану стиснутих дощатоклеєних колон при локальній дії високих температур;
- виконати експериментальні дослідження з вивчення напружено-деформованого стану стиснутих колон при локальній дії високих температур від початку навантаження до моменту руйнування;
- визначити ефективність застосування вогнезахисту дощатоклеєних конструкцій гіпсокартонними листами при дії високої температури, в лабораторних умовах та в натурному експерименті;
- на основі отриманих експериментальних даних дослідити вплив місцевого горіння деревини в стиснутих дерев'яних колонах та порівняти їх з теоретичними існуючими нормативними методами розрахунку;



- розробити практичні рекомендації з розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон, що працюють в умовах локальної дії високих температур;
- розробити математичну модель розрахунку температурної задачі при локальному впливі високих температур на незахищений та захищений переріз деревини.

**Предмет дослідження** – несуча здатність та деформативність дерев'яних дощатоклеєних колон при одночасній дії стиску та локальному односторонньому нагріванні А також дослідження поведінки навантажених дерев'яних колон з вогнезахистом та без нього.

**Об'єкт дослідження** - напружено-деформований стан дерев'яних дощатоклеєних колон при одночасній дії стиску та локальному впливі високої температури.

**Методи досліджень:** експериментальне випробування моделей колон з визначенням несучої здатності та деформативності при дії стиску та одностороннього нагрівання, аналітичні та чисельні методи розрахунку процесів нагрівання, горіння та руйнування деревини та її вогнезахисту.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

- Вперше виконано випробування моделі дерев'яних дощатоклеєних колон на спільну дію вертикального навантаження та локального впливу температури;
- Вперше розроблено методику для випробувань конструкцій в лабораторних умовах на силову дію та вплив високої температури з можливістю вимірювання деформацій в зоні горіння конструкції;
- Розроблено методику розрахунку температурних полів в перерізі колони на основі числових математичних методів.

**Наукова та практична цінність роботи.** Розроблена методика для випробувань конструкцій в лабораторних умовах на силову дію та вплив високої температури (перспектива - моделювання умов реальної пожежі) з можливістю вимірювання деформацій в зоні горіння конструкції.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 7-ми друкованих працях в фахових виданнях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел із 108 найменувань та додатків. Повний обсяг роботи складає 176 сторінок, в тому числі: списку використаних джерел на 11-ти сторінках, 69 рисунків, - 12 таблиць та 4-х додатків.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ У ГАЛУЗІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Сьогодні сучасного будівництва відкриває все ширші можливості для використання деревини як будівельного матеріалу. Сучасність повертається до використання природних, екологічних матеріалів не лише як тренд, а як необхідність подбати про майбутні покоління. Дана тенденція широко поширена в Європейських країнах [1], які мають на меті відновити екосистему міста, максимально трансформувавши бетонно-бітумний ареал у природньо наближений.



Рис.1.1. Проект найвищого дерев'яного хмарочоса у світі м. Берлін.

Окрім екологічних чинників, дерево має суто архітектурну цінність. Із даного матеріалу можна отримати чимало неймовірних форм, як приклад – це Метрополь Парасоль, що у Севільї [2]. Тому із архітектурної точки зору потенціал дерева на даний момент не можна описати як той, який уже вичерпав себе, що не скажеш про інші будівельні матеріали, які обмежені чималими чинниками.

Та на жаль, у такого матеріалу як дерево існує один важливий недолік, який не дозволяє реалізувати чимало. Це – вогнестійкість. Дана проблема переслідує дерево із моменту першого його використання у будівництві. В середньовіччі даний матеріал був основним для будівництва житлових, громадських та сакральних будівель. Відсутність вогнезахисту та необережне поводження із вогнем привело до страшених наслідків. Так у 1842 році вщент

згорів німецький Гамбург [3]; трьома століттями раніше, у 1527 році, така ж доля спіткала український Львів [4]. І на жаль, дана проблема продовжує існувати і сьогодні. Споруди, яким вдалось вціліти, піддаються чималому ризику під час проведення реставрацій, модернізацій. Найяскравішим прикладом таких ризиків став собор Паризької Богоматері [5], дерев'яний дах якого згорів у 2019 році.



Рис. 1.2. Пожежа в соборі Паризької Богоматері.

Даний недолік деревини породив чималий науковий інтерес до вивчення питання вогнезахисту та вогнестійкості. Дослідження у даному напрямку проводять уже багато років та універсального методу боротьби із низькою вогнестійкістю не знайдено. Існує чимало способів забезпечення вогнестійкості, надієвіший із них це введення додаткових захисних шарів інших матеріалів, проте під час експлуатації споруди, аварійних ситуацій обшивка із даного матеріалу може пошкодитись, тим самим піддавши частину перерізу локальним температурним впливам.

## **1.1. ОСНОВНІ ВИМОГИ ТА АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ У СУЧАСНИХ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТАХ.**

### **1.1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕРЕВИНИ, ЯК БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ**

Сучасні українські будівельні норми вимагають досягнути в результаті розрахунку і проектування дерев'яних будівельних конструкцій виконання таких умов та обмежень, які подані у діючих нормах проектування [6–8] :

Розрахункові схеми конструкцій повинні враховувати наступне:

- властивості деревини;
- умовність розрахункових схем;
- фізико-механічні характеристики матеріалів (міцнісні та жорсткісні);
- характер роботи матеріалів залежно від плину часу;
- кліматичні умови місцевості будівництва об'єкта, що проектується;
- навантаження і впливи;
- особливі впливи та навантаження (зокрема вплив підвищених температур при пожежі);
- різні розрахункові випадки (монтажні навантаження, стадії будівництва, зміна умов обпирання тощо).

Відповідно до сучасних уявлень про деревину, вона характеризується різними механічними властивостями [9], [10]:

- пружними (при навантаженні, деформація відбувається миттєво, а при знятті навантаження матеріал повністю відновлюється);
- пластичними (при навантаженні деформація реалізуються миттєво, а при знятті навантаження деформації повністю незворотні);
- в'язкими (при додаванні навантаження деформації запізнюються в часі);
- анізотропії (при навантаженні властивості матеріалу розрізняються за напрямками).

Необхідно також відзначити, що при підвищеній температурі відбувається зменшення модуля пружності деревини, її пластичних і в'язких деформацій, а також зменшення міцності.

У загальному випадку проектування дерев'яних будівельних конструкцій зводиться до такого алгоритму:

1. Створення розрахункової схеми, що включає в себе:

- конструкції та їх елементи;
- з'єднання;
- граничні умови (тобто тип опорних вузлів).

2. Вибір виду навантаження і впливу.

3. Розрахунок несучої здатності конструкції для таких видів напруженого стану:

- центрально-розтягнуті вздовж волокон елементи;
- центрально-стиснуті вздовж волокон елементи;
- елементи, що працюють на згин;
- елементи, що працюють на осьовий розтяг зі згином;
- елементи, що працюють на осьовий стиск зі згином
- кручення;
- стиск поперек волокон;
- стиск під кутом до волокон;
- розтяг поперек волокон.

4. Розрахунок деформацій, які не повинні перевищувати деяких обумовлених в технічному завданні та нормативних документах граничних значень. Основними з якими є:

- податливість вузлів;
- граничні прогини балок;
- коливання елементів

5. Розподіл конструкції і їх елементів з цільної і клеєної деревини.

6. Також необхідно враховувати особливості розрахунку напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій при підвищеній температурі.

8. Уточнення проектування для різних типів конструкцій: балки, ферми, арки, рами та інших, враховуючи особливості їх роботи.

Аналіз розрахункових методів для дерев'яних конструкцій дозволив виділити наступні основні тези:

1. Розрахунок і проектування дерев'яних конструкцій відповідно до вимог сучасних українських нормативних документів при звичайних температурах (від  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$ ), в принципі не відрізняється від розрахунку будівельних конструкцій з інших матеріалів (пластмас, металу, бетону і т.д.) і дозволяє вирішувати практичні завдання.

2. При розрахунку на вогнестійкість (вплив високих температур – вище  $50^{\circ}\text{C}$ ) слід враховувати властивості деревини:

- міцність;
- пружність;
- пластичність;
- в'язкість.

3. Необхідно уніфікувати види напруженого стану дерев'яних конструкцій шляхом використання техніки анізотропних просторових кінцевих елементів, оскільки в цьому випадку немає потреби класифікувати вид напруженого стану і напрямок навантаження уздовж або поперек волокон.

Розгляд існуючих методик розрахунку дерев'яних конструкцій на вогнестійкість дозволив сформулювати наступні умови [7, 8, 11, 12]:

1. Сучасні будівельні норми вимагають, щоб при розрахунку на вогнестійкість були враховані наступні чинники:

- поведінка конструктивної системи за підвищених температур;
- можливий вплив активних та пасивних систем вогнезахисту;
- запобігання передчасного руйнування конструкції (несуча здатність);
- обмеження поширення вогню (полум'я, гарячих газів, надлишкового нагрівання) за межі визначених зон (огороджувальна здатність).

2. При розрахунку слід розрізняти номінальний і параметричний вогневий вплив.

2.1. Для номінального температурного режиму елементи мають відповідати граничним станам з вогнестійкості R, E та I наступним чином:

- огорожувальна здатність: цілісність (граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати цілісності E), якщо вимагається, теплоізолююча здатність (граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолюючої здатності I);

- тільки несуча здатність: механічний опір (граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності R);

- огорожувальна та несуча здатність: граничні стани з вогнестійкості R, E та, якщо вимагається, I.

- граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати несучої здатності R вважається забезпеченим, якщо забезпечена несуча здатність протягом потрібного часу під час вогневого впливу;

- граничний стан з вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолюючої здатності I вважається забезпеченим, коли підвищення середньої температури по всій поверхні, що не обігривається, обмежене  $140^{\circ}\text{C}$ , а підвищення максимальної температури у будь-якій точці поверхні не перевищує  $180^{\circ}\text{C}$ .

2.2. Для параметричного температурного режиму несуча здатність зберігається протягом всієї пожежі, включаючи фазу затухання, або визначеного періоду часу. Для перевірки огорожувальної здатності застосовується наступне, за умови, що нормальна температура становить  $20^{\circ}\text{C}$ :

- підвищення середньої температури по всій необігривній поверхні обмежене  $140^{\circ}\text{C}$ , а підвищення максимальної температури у будь-якій точці поверхні не перевищує  $180^{\circ}\text{C}$  протягом фази нагрівання, доки не буде досягнута максимальна температура повітря;

- підвищення середньої температури по всій необігривній поверхні обмежене значенням  $\Delta T_1$ , а підвищення максимальної температури у будь-якій точці поверхні не перевищує значення  $\Delta T_2$  протягом фази затухання.

3. Розрахунок несучих конструкцій в умовах пожежної небезпеки зводиться до обліку таких чинників:

- зміни характеристик міцності та деформативності деревини при зміні її температури;



- зменшення перерізів будівельних конструкцій за рахунок вигорання деревини;

- зміни розрахункової схеми будівельних конструкції за рахунок виключення під час пожежі її окремих елементів з роботи.

4. При розрахунку слід враховувати захищені від впливу вогню і незахищені поверхні. При цьому слід приймати, що горіння (або обвуглювання) відбувається по всій поверхні елемента.

5. Швидкість горіння обвуглювання слід приймати:

5.1. Для незахищених поверхонь - постійною.

5.2. Для поверхонь, захищених вогнезахисними покриттями, іншими захисними матеріалами або конструктивними елементами, необхідно враховувати, що:

- початок обвуглювання затримується до деякого часу  $t_{ch}$ ;
- обвуглювання може починатися до руйнування вогнезахисту зі швидкістю обвуглювання нижчою, ніж та, що наведена в таблиці 3.1 [9], до настання часу руйнування  $t_f$  вогнезахисту;
- після настання часу руйнування  $t_f$  вогнезахисту, швидкість обвуглювання перевищує значення, наведені в таблиці 3.1 [9], до настання часу  $t_a$ , описаного нижче;
- для часу  $t_a$ , коли глибина обвуглювання дорівнює меншому зі значень глибини подібного елемента без вогнезахисту або 25 мм, швидкість обвуглювання знову набуває значень, наведених в таблиці 3.1 [9].

6. У ході розрахунку вогнезахисту дерев'яних конструкцій слід враховувати такі параметри:

- початок обвуглювання;
- швидкість обвуглювання;
- початок обвуглювання, для дерев'яних конструкцій із захистом;
- глибина обвуглювання;
- залишковий переріз;
- час руйнування захисного покриття.

7. У ході розрахунку вогнестійкості дерев'яних конструкцій слід розрізняти такі елементи конструкцій:

- колони;
- балки;
- з'єднання елементів конструкцій.

Проаналізуємо сучасні уявлення про склад і властивості деревини [9].

Структура деревини складається із природних матеріалів – таких як лігнін, целюлоза, геміцелюлоза та зола [10]. Вміст целюлози становить приблизно 50% від маси. Деревина м'яких порід містить лігніну від 23 - до 33%, водночас в деревині твердих порід його від 16 до 25%. Типова структура волокон деревини зображена на рис 1.3.

Вищий вміст лігніну збільшує кількість деревного вугілля [13]. В деревині у незначних кількостях наявні азот та сірка (0,1-0,2%), елементарний склад сухої деревини такий: 50% вуглецю, 6% водню, 44% кисню.

Щільність деревини становить в межах від 160 кг/м<sup>3</sup> до 1040 кг/м<sup>3</sup>, але більшість порід, які використовують в будівництві, мають щільність від 320 кг/м<sup>3</sup> до 720 кг/м<sup>3</sup>. Щільність має прямий вплив на роботу деревини під час дії високих температур – деревина, густина якої є більшою, обвуглюється повільніше.

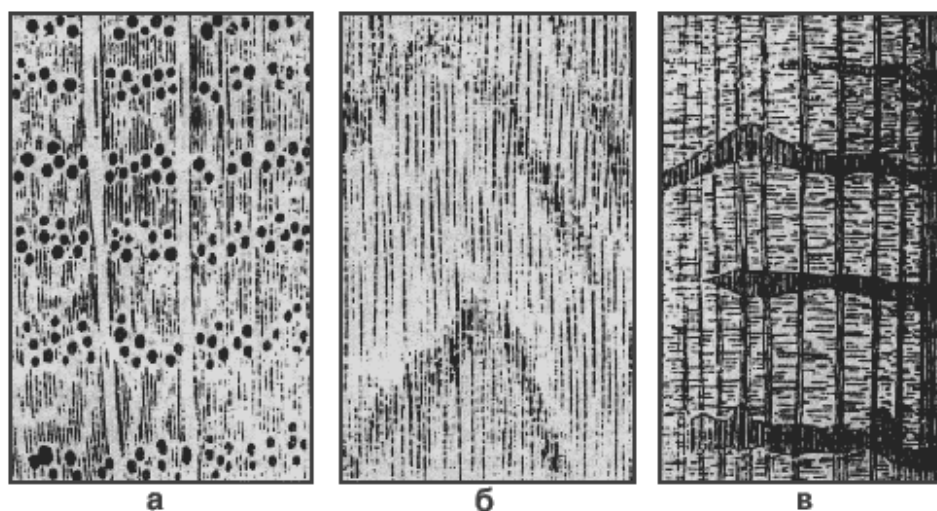


Рис. 1.3. Вигляд серцевинних волокон деревини в розрізі [14]: а) поперечному; б) тангенціальному; в) радіальному.

Важливою характеристикою деревини є також її вологість. Це не постійна характеристика, яка змінюється в залежності від умов експлуатації. Так, наприклад, вологість свіжої деревини може становити більше 100 %, а вологість висушеної деревини коливатиметься від 12 % до 30 % в залежності від умов висушування. Вологість також має прямий вплив на фізичні характеристики деревини – знижує міцність та швидкість обвуглювання деревини.

Дослідженнями впливу вологості на міцність та деформативність деревини подані у роботах Яснія. П.В. та Гомона С.С. [15, 16]. Ними експериментально було доведено що при зменшенні вологості від 30% до 12%, міцність деревини всіх порід збільшується. Критичні деформації зменшуються.

Звідси виходить, що левову частку впливів на фізичні характеристики деревини вносять – щільність, вологість, орієнтація волокон та температура навколишнього середовища. Окрім цього, важливими є методи визначення даних фізичних характеристик, наявність сучків.

### 1.1.2. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ДЕРЕВИНУ

У [17] подані значення міцності деревини при впливі температур, що значно менші, ніж ті, які прийняті в нормальних умовах експлуатації. Дані величини експериментально перевірені в Інституті дослідження деревини. Ці значення прийнято за основу для існуючих Європейських норм проектування.

Згідно із [8, 12] міцність деревини становить значення за нормальних умов із понижуючим коефіцієнтом, що являє собою графік залежності від температури та умов роботи деревини (рис.1.4). У даному співвідношенні враховано також вплив повзучості.

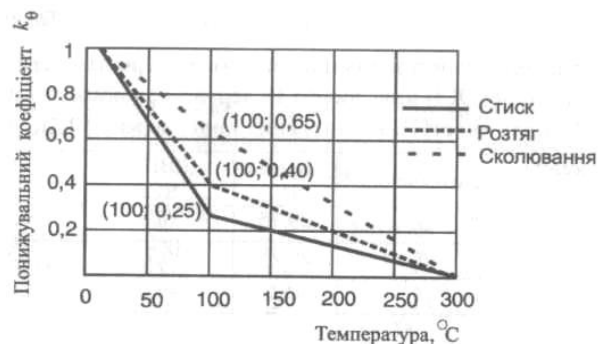


Рис. 1.4. Понижувальний коефіцієнт для характеристик міцності паралельно до волокон для хвойних порід деревини [8, 12].

Також необхідно враховувати зниження міцності при умовах роботи деревини. Так, при стиску, як і перпендикулярно до волокон, так і паралельно до волокон, застосовують додаткові понижуючі коефіцієнти. Що стосується сколювання, то за умови паралельності двох компонентів напруження, які прикладені паралельно до волокон, міцність прирівнюють до такого ж значення, як і для стиску паралельно волокнам.

У випадку модуля пружності, то згідно із [14] при вмісті вологості 0 %, дана характеристика змінюється лінійно аж до величини температури до 200 °C (рис. 1.3). При вищих значеннях температури графік функції набуває нелінійного вигляду. Якщо до даних умов додати вологість повітря (як для сухої деревини 12%), то лінійний вигляд функції зміни спостерігався до величини температури 180 °C.

За 100 % прийнято її значення за нормальних умов, тобто при температурі 20°C (рис.1.5). Затемнена ділянка на графіках – показує розкид експериментальних значень.

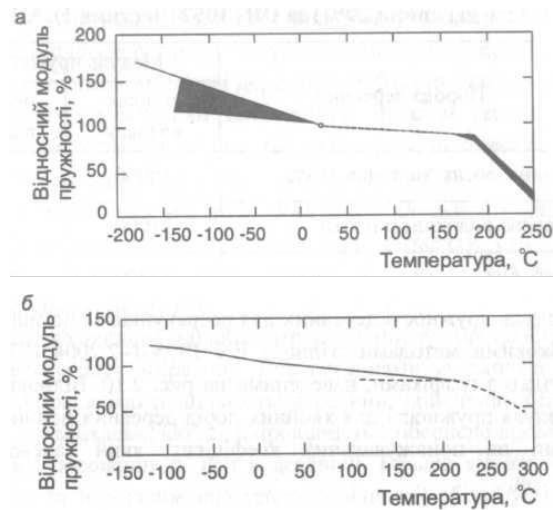


Рис. 1.5. Вплив температури на модуль пружності вздовж волокон за вологості 0 та 12%; а) вміст вологості 0 %; б) вміст вологості 12 %.

Як і значення міцності, значення модуля пружності деревини згідно з [8, 12] приймають у відповідності до графіків, наведеними на рис. 1.6. Значення модуля пружності повинні бути застосовані разом із понижувальним коефіцієнтом, який являє собою функцію залежності від температури.

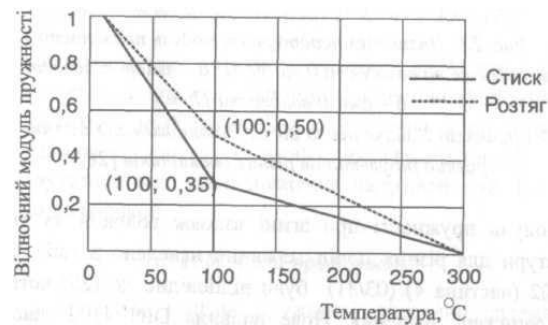


Рис. 1.6. Вплив температури на модуль пружності паралельно до волокон для хвойних порід дерева [8, 12].

Теплотехнічна задача вогнестійкості та оцінювання теплоізолюючої здатності будівельних елементів являє собою визначення зміни теплопровідності із зростанням температури. У загальному випадку, теплопровідність – це кількість тепла, яке проходить за годину через 1 м<sup>2</sup> речовини завтовшки 1 м, за різниці температур  $\Delta T=1\text{K}$ .

Розглянемо поперечний переріз дерев'яного елемента під час пожежі. Характерно можна виділити наступні зони: деревне вугілля, зона розкладу, суха деревина, у кожній із них будуть різні фізичні характеристики. Що приводить до того, що точний розрахунок може бути виконаний із використанням методу скінченних елементів.

Згідно із досліджень Шаффера [14] – низька теплопровідність деревини знижує швидкість, з якою тепло передається всередину, що виводить залежність, що теплопровідність є обернено пропорційною до об'єму порожнин у деревині. Більша кількість вільних порожнин та пор (зниження теплопровідності) збільшує швидкість деградації матеріалу внаслідок локального перенагрівання поверхні.

Спрощена ж методика розрахунку має на увазі використання середньої температури в перерізі для визначення теплопровідності.

Згідно з [18] теплопровідність деревини та матеріалів на її основі залежить від температури, щільності та вмісту вологості. Як наближені, можуть використовуватись такі значення, визначені при температурі 20°C та впливу теплового потоку перпендикулярно до волокон (грані):

$\lambda_0 = 0,13$  Вт/м/К - для м'якої деревини;

$\lambda_0 = 0,19$  Вт/м/К - для твердої деревини;

$\lambda_0 = 0,10$  Вт/м/К - для деревного вугілля.

Теплопровідність з урахуванням щільності та вмісту води може бути визначена за формулою [14]:

$$\lambda_0 = [237 + 0,02 \cdot \rho_0 \cdot (1 + 2 \cdot W)] \cdot 10^4, \quad (1.1)$$

де,  $\rho_0$  - щільність сухої деревини, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  - вміст вологості, %.

Важливим фактом під час розрахунків є те, що в повздовжньому напрямку теплопровідність є більшою у 2-2,8 разів, ніж у поперечному.

Використовуючи поглиблені методи розрахунку, теплопровідність для стандартного вогневого впливу для хвойних порід деревини приймають відповідно до рис. 1.7.

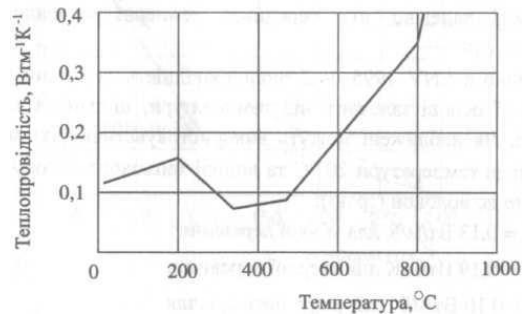


Рис. 1.7. Співвідношення температура—теплопровідність для деревини та деревного вугілля [19].

Для розв'язку температурної задачі в деревині, окрім теплопровідності існує ще одна характеристика – це теплоємність. Теплоємність - це кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання 1 кг речовини для збільшення її температури на 1°C. Тобто, із збільшенням маси деревини – тим активніше деревина абсорбує тепло і тим повільніше відбуватиметься її деградація.

Значення теплоємності використовують для розрахунку теплоізолюючої здатності. Теплоємність залежить від вмісту вологості та температури деревини і становить за 20% вологості  $c=1800$  Дж/кгК, а за [17]  $c=2100$  Дж/кгК.

Для спрощення розрахунків теплоємність приймають залежно від середньої температури залишкового перерізу.

Теплоємність м'якої деревини визначається [20]:

$$c = \frac{c_{dry} + W \cdot c_{water}}{1 + W} \text{ для } \theta_w \leq 100^\circ\text{C}$$

$$c = c_{dry} \text{ для } \theta_w > 100^\circ\text{C}, \quad (1.2)$$

де теплоємність сухої деревини приймається:

$$c_{dry} = 1110 + 4.2\theta_w \quad (1.3)$$

і теплоємність води дорівнює  $c_{water} = 4200$  Дж/кгК.

### 1.1.3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТИСНУТО-ЗІГНУТИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Інше важливе запитання – це стійкість стержневих конструкцій. Тому розглянемо детальніше процес розрахунку та дослідження даної тематики.

Питання стійкості стержневих дерев'яних конструкцій було, є, і буде причиною дискусій та нових наукових робіт для вчених всього світу ще на багато років вперед.

Що стосується тематики деревини в наукових роботах, описано та проведено експериментальні дослідження впливу розподілу зусилля при аналізі стабільності стержневої конструкції [21]. Дана робота описує аналіз роботи конструкції при завантаженні її із ексцентриситетом та виконує експериментальний аналіз напружень та стабільності конструкції при дії даного типу завантаження. У роботі [22] виконаний аналіз проблеми стійкості та зроблена спроба врахувати нестандартні умови роботи дерев'яних стержнів та випадковостей у структурі самого матеріалу.

Значний вклад в дослідження роботи стійкості дерев'яних конструкцій зробив проф. Кліменко В.З. [23–27]. У своїх роботах він описував та порівнював розрахунки стійкості різними методами. За результатами його робіт можна стверджувати, що при розрахунку стійкості різними методами, розбіжність у максимальних напруженнях є досить значною, що підкреслює необхідність проведення обширних досліджень у цьому напрямку.

У роботі [23] проаналізовано розвиток методик розрахунку елементів дерев'яних конструкцій, які працюють на згин зі стиском. У даному дослідженні було доведено, що методика, яка була розроблена у 30-х рр. минулого сторіччя і є актуальною і до цього часу. Про це можна стверджувати на підставі лише того, що вона більш проста порівняно з іншими, не відповідає дійсній роботі дерев'яних стиснено-зігнутих елементів.

Важливою є робота щодо визначення критеріїв стійкості під час пожежі [28]. У даній роботі експериментально визначені емпіричні залежності зміни приведенного модуля пружності та напружень при дії температурних впливів.



Дана праця описує класичні залежності, які використовуються у сучасних нормах, і загальний процес роботи під час горіння, проте не описана методика практичного застосування даних залежностей.

Великим вкладом в дослідження дерев'яних конструкцій вкладено в роботах проф. Гомона [29] та проф. Найчука А.Я. [30–33].

У своїй роботі [30] проф. Найчук аналізує проблематику розбіжності теоретичних та експериментальних значень досліджень дерев'яних конструкцій, які працюють в складному напружено-деформованому стані. Використовуючи досвід в обстеженнях та методи механіки руйнування, було досліджено конструкції дерев'яних стержневих елементів які працюють в умовах складного НДС. Для експерименту спеціально було обрано зразки із дефектами, такими як сучки.

Розрахунок конструкцій на стійкість характеризується також її деформацією. У роботі проф. Гомона [34], описаний новий підхід до визначення критичних деформацій на стиск вздовж волокон теоретичним способом. Автор розділяє формулу для визначення критичних деформацій на дві складові – пружну та пластичну. Підтвердження даної методики апробовано на більш ніж 100 сортах деревини.

У сучасних українських та європейських [11, 35, 36] нормативних документах наведена методика врахування втрати стійкості перерізу дерев'яного стержня, який працює на стиск вздовж волокон.

Граничне напруження стиску визначається за формулою [7]:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{net}}, \quad (1.4)$$

де,  $N_d$  – розрахункове зусилля стиску вздовж волокон;

$A_{net}$  – розрахункова площа перерізу елемента (нетто).

Та при розрахунку на стійкість повинні задовольнятися умови:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1; \quad (1.5)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1, \quad (1.6)$$

де,  $f_{c,0,d}$  – розрахункове значення міцності при стиску вздовж волокон;

$k_{c,y}, k_{c,z}$  – коефіцієнти повздовжнього згину, що визначаються за формулами:

$$k_{c,i} = \frac{1}{k_i + \sqrt{k_i^2 + \lambda_{rel,i}^2}}; \quad (1.7)$$

$$k_i = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,i} - 0,3) + \lambda_{rel,i}^2); \quad (1.8)$$

де,  $\beta_c$  – коефіцієнт який приймається:

0,2 – для цільної деревини;

0,1 – для клеєної деревини;

$\lambda_{rel,i}$  – приведена гнучкість, що визначається за формулою:

$$\lambda_{rel,i} = \frac{\lambda_i}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (1.9)$$

де,  $E_{0,05}$  – п'ятивідсотковий квантель модуля пружності вздовж волокон деревини;

$f_{c,0,k}$  – характеристичне значення міцності при стиску вздовж волокон;

$\lambda_i$  – гнучкість центрально-стиснутого елемента:

$$\lambda_i = \frac{l_{ef,i}}{i_i}, \quad (1.10)$$

де,  $l_{ef,i}$  – розрахункова довжина елемента;

$i_i$  – радіус інерції перерізу відносно відповідної осі.

Підсумовуючи вище згадане, можна дійти до висновку, що незважаючи на те, що у національних нормативних документах розроблені практичні методи розрахунку стержневих конструкцій на стійкість, вчені досі мають чимало відкритих питань дослідження роботи дерев'яних конструкцій при їхній втраті стійкості.

Аналіз прийнятої в нормативних документах і технічній літературі існуючих методик розрахунку дерев'яних конструкцій дозволив зробити наступні висновки:

1. Розрахунок слід виконувати за несучою здатністю та за деформаціями.
2. В якості моделі деревини слід використовувати модель пружного ізотропного середовища.
3. Властивості повзучості і пластичності слід враховувати шляхом введення коригувальних коефіцієнтів.
4. Властивість анізотропії слід враховувати шляхом роздільного аналізу напружень і деформацій, спрямованих уздовж і поперек волокон.
5. Температурні залежності міцності і деформаційних властивостей деревини слід враховувати з використанням графіків, поданих у актуальних нормативних документах.
6. Елементи дерев'яних конструкцій, такі як балки та колони, у загальному випадку та для температурних задач слід інтерпретувати, як стержні.
7. При визначенні температурних полів всередині дерев'яних конструкцій слід використовувати кондуктивний механізм теплопередачі.

## **1.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВИНИ**

Як уже згадано вище, питання горіння деревини є об'єктом дослідження науковців уже протягом багатьох років. Загалом можна виділити два основних напрямки досліджень: власне саму поведінку деревини під час горіння та використання різного роду вогнезахисту для деревини. У даному розділі представлено огляд досліджень за вищезгаданою темою.

Спочатку потрібно розглянути сучасні уявлення про поведінку дерев'яних конструкцій в умовах пожежі.

У Коніга [37] розроблено розрахункову модель поведінки споруди під час контрольованої пожежі для дерев'яних рамних стін та конструкцій підлог з обшивкою гіпсокартонними листами та порожнинами, заповненими ізоляцією з

мінеральних або скляних волокон. Описана модель, складається з двох фаз обуглювання: фази захисту та фази після захисту, показано на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Фази обуглювання захищеної деревини [9].

Розглянемо процес горіння детальніше. Фаза захисту - це відрізок часу, протягом якого захисні елементи закріпленні на конструкції, яку досліджують. Ця фаза складається з фази перед обуглюванням, упродовж якої дерев'яна конструкція не обуглюється (до часу  $t_{pr}$ ) та фази обуглювання 2, коли деревина обуглюється, але обшивка ще не зруйнована. Фаза захисту закінчується, коли проходить час  $t_{bf}$ , під час якого обшивка руйнується та настає фаза обуглювання 3, упродовж якої деревина безпосередньо піддається вогневому впливу.

Відповідно до даної моделі величина обуглювання описана наступним виразом [8]:

$$d_{char} = \beta_0 t, \quad (1.11)$$

де,  $d_{char}$  - глибина обуглювання;  $\beta_0$  - швидкість обуглювання для одновимірного обуглювання початково – незахищеної деревини, експонованої за стандартною пожежею (0,67 мм/хв для хвойних порід дерева);  $t$  – тривалість впливу вогню.

Відповідно у свою чергу швидкість обуглювання для фази захисту [8]:

$$\beta_2 = k_s k_2 \beta_0, \quad (1.12)$$

де,  $k_2$  – ізоляційний коефіцієнт для захисної обшивки.

Відповідно глибину обуглювання для фази 2 визначають як: [8]:

$$d_{char,2} = k_s k_2 \beta_0 (t - t_{pr}), \quad (1.13)$$

де,  $t_{pr}$  - час захисту проти обвуглювання.

Подібно глибина обвуглювання для фази після захисту зростає відповідно до швидкості обвуглювання [8]:

$$d_{char,3} = k_s k_2 \beta_0 (t_{bf} - t_{pr}) + k_s k_3 \beta_0 (t - t_{bf}) = k_s \beta_0 [k_2 (t_{bf} - t_{pr}) + k_3 (t - t_{bf})], \quad (1.14)$$

де  $k_3$  - коефіцієнт післязахисту від зростання експозиції;  $t_{bf}$  - час руйнування обшивки.

Співвідношення вищенаведених коефіцієнтів розподіляється так:  $\beta_0$  - 0,67 мм/хв; звідки  $k_s$  записують таким поліномом [8]:

$$k_s = 0,000167b^2 - 0,029b + 2,27, \quad (1.15)$$

де,  $b$  - ширина перерізу, мм.

Коефіцієнт ізоляції  $k_2$  базується на такому лінійному співвідношенні для  $\beta_2$  [8]:

$$k_2 = \frac{\beta_{2,linear}}{k_s \beta_0} \quad (1.16)$$

Подібно коефіцієнт післязахисту  $k_3$  базується на такому лінійному співвідношенні для  $\beta_3$ :

$$k_3 = \frac{\beta_{3,linear}}{k_s \beta_0} \quad (1.17)$$

Руйнування захисного шару зі стандартного гіпсокартону починалося зазвичай після того, як дерев'яні елементи починали обвуглюватись після обшивки, тобто  $t_{bf} \approx t_{pr}$ . Дослідження Коніга [37] показали, що захисний шар стелі відпадав раніше, ніж захисний шар стін. Тому варто приймати температуру руйнування обшивки стін більшою, ніж температуру руйнування обшивки стелі.

У дослідженнях Лау та Увайта [38] застосована емпірична модель швидкості обвуглювання для хвойних порід дерева, які піддавались впливу за постійної температури експозиції 500 °С. Ними було досліджено 55 зразків завдовжки 4880 мм завантажені статичною силою 15,57 кН ( що становило 1/3 несучої здатності на розтяг) у вогневій печі. Швидкість обвуглювання змінювалась від 0,397 мм/хв на початку процесу при  $t = 0$  до 0,524 мм/хв за

$t = 1000$  с. Середня швидкість обуглювання становила 0,451 мм/хв за швидкості обуглювання вузьких граней зразків, за якими велося спостереження, була подібною до швидкості обуглювання широких граней.

Результати можна виразити через лінійну регресію, як зменшення залишкового перерізу за формулою:

$$A(t) = -1,626t + 3080, \quad (1.18)$$

де,  $A$  - площа залишкового перерізу, мм<sup>2</sup>;  $t$  - час, с.

На основі регресії швидкості обуглювання можна отримати із формули:

$$\beta(t) = -\frac{\alpha}{t} \left[ \frac{\alpha t}{4} + \frac{1}{16} (a_0 + b_0) \right]^{1/2}, \quad (1.19)$$

де,  $t$  - час, с;  $a_0$  та  $b_0$  - початкові розміри перерізу, мм;  $\alpha = \frac{\partial A(t)}{\partial t} = -1,626$ .

Встановлена швидкість для масивних дерев'яних конструкцій, експонованих за [33], була нижчою за 0,6 мм/хв. Це викликано відхиленням опору для зразків при температурі 500 °С, від стандартної температурної кривої. Формула (1.19) модифікована для прогнозування глибини обуглювання. Формула являє собою функцію часу під впливом динаміки температури, проте такий підхід вимагає тарування результатів випробування, для того, щоб ввести відповідні калібруючі коефіцієнти.

Тран та Вайт [39] досліджували тепловиділення, втрату маси, швидкість обуглювання зразків червоного дерева, сосни, червоного дуба, липи на тепловий потік в межах 15 та 55 кВт·м<sup>2</sup>, використовуючи модифікований калориметр державного університету Огайо.

Дослідні зразки були виконанні із клеєних пиломатеріалів розмірами 150x150x64 мм. Усі зразки були закріпленні вертикально, тепловий потік був спрямований перпендикулярно до волокон деревини. Сумарно було випробувано 32 зразки, які об'єднували чотири породи деревини, чотири рівні теплового потоку та два контрольні.

Як індикатор обуглення, приймали температуру 300° С. Середня швидкість обуглювання, яка залежить від часу, приймалась такою, за якої межа обуглювання досягала глибини 36 мм.

Як модель для прогнозування середньої швидкості обуглювання, використовують емпірично визначену залежність:

$$\dot{c} = \frac{\dot{m}}{\rho_w}, \quad (1.20)$$

де,  $\dot{m}$  - середня швидкість втрати маси, кг/с;  $\rho_w$  - щільність в сухому стані, кг/м<sup>3</sup>.

Швидкість втрати маси можна визначити через інтенсивність тепловиділення з випробувань за виразом:

$$\dot{m} = \frac{Q}{h_c}, \quad (1.21)$$

де,  $Q$  - інтенсивність тепловиділення, Вт;  $h_c$  - ефективна теплота згорання, Дж/кг.

Тран [39] використав емпірично виведену залежність для  $h_c$  за виразом

$$h_{c,dry} = 0,057Q + 11,88, \quad (1.22)$$

Вайт та Тран [40] випробували по два зразки з чотирьох порід дерева (червоне дерево, сосна, червоний дуб та липа) на чотири номінальні рівні теплового потоку (15, 25, 35, 50 кВт/м<sup>2</sup>), використовуючи калориметр OSU.

Результати цих досліджень показано на рис. 1.9.

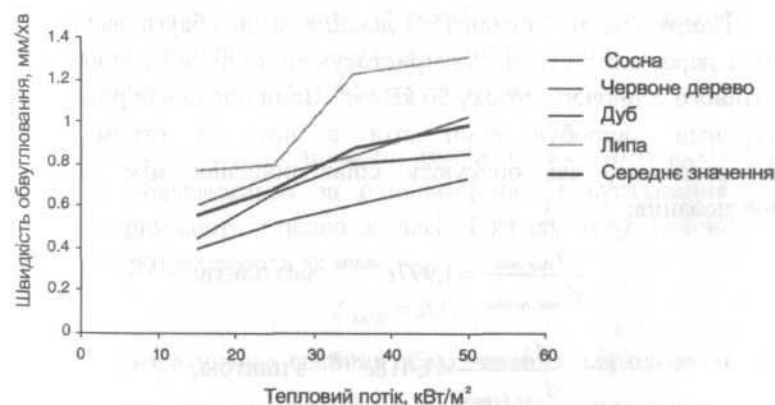


Рис. 1.9. Швидкість обуглювання деревини [40, 41].

За результатами своїх досліджень вони зробили такі висновки [39, 40]:

- процес обуглювання деревини може розглядатися як лінійна функція від часу;
- із підвищенням рівня теплового потоку поведінка стає нелінійною через збільшення часу, необхідного для отримання глибини обуглювання;

- швидкість обвуглювання пропорційна до відношення рівня зовнішнього теплового потоку до щільності;
- температура в необвугленій деревині може бути описана показниковою (експоненціальною) функцією.

У загальному пожежа у будь-якій споруді характеризується як аварійна ситуація, що може привести як і до часткового пошкодження, так і до повного руйнування споруди. Досвід даних розрахунків та прикладів пожеж поданий у роботах шведських вчених [42]. У даній роботі виконаний аналіз прогресуючого обвалення споруд, які були зруйновані під час реальних пожеж. Проведена оцінка методів моделювання пожеж. Проведений аналіз та порівняння методів розрахунку дерев'яних конструкцій для різних способів склеювання деревини. Методи розрахунку прийняті як і ті, які є описані в нормах [8, 12], так і методи, описані у стандартах ISO [43]. Порівнюючи результати, отримані в дослідженнях в [44, 45], було доведено доцільність використання методу приведених характеристик для розрахунку, як для дерев'яних елементів клейних паралельно, так і вздовж волокон.

Стосовно убезпечення конструкцій від повного руйнування, базуючись на досвіді попередніх років [46], рекомендують наступне:

- Обмежити поширення пожежі в споруді.
- Проектувати споруди із можливістю контролювати пожежу.
- Забезпечити достатню несучу здатність елементів на випадок аварійних ситуацій.

Стосовно проектування споруд із контрольованими пожежами, для споруд із деревини рекомендовано застосовувати наступне [44, 47]:

- Максимально обмежити кількість відкритих поверхонь деревини.
- Уникати руйнації вогнетривкого шару дерев'яних елементів.
- У разі руйнації захисного шару – забезпечити достатню міцність та надійність конструкції. Убезпечити її від раптового руйнування у вузлах (місця, де присутні різні матеріали).



Окремим розділом досліджень пожеж є натурні випробувань на вогнестійкість.

Варто взяти до уваги роботу вчених із проекту під назвою SOFIE [48], які під своїм керівництвом виконали натурне дослідження пожежі. Дослідження були проведені у м. Цукубе, що у Японії і являли собою повномасштабне випробування споруди із клейної деревини (CLT).



Рис.1.10. Повномасштабне натурне випробування дерев'яної споруди у Японії [48].

Трьох поверховий каркасний дерев'яний будинок був виконаний із клеєної деревини. Усі перекриття та стіни були виконанні із дерев'яних панелей із утеплювачем та вогнезахисним шаром гіпсокартону (рис.1.11). Під час пожежі спостерігали за поведінкою споруди та температурою у приміщенні. У кожний конструктивний та наповнюваний шар була встановлена термопара, яка дозволяла слідкувати за зміною температури в часі. Було визначено, що тривалий час під час пожежі вогнезахисний шар не давав займатись основним конструктивним шаром протягом тривалого часу, що давало можливість зберегти несучу здатність будинку та запобігти його швидкому обваленню.

Варто звернути також увагу на роботи проф. Шналя [49–51]. У роботі [51] було проаналізовано вплив вогнезахисних розчинів на глибину обуглювання стійок в умовах параметричного вогневого навантаження. Було проаналізовано 4 зразки стійок перерізом 150x150 мм із вогнебіозахистом та обшитими ПВХ панелями. У результаті дослідження було доведено

доцільність використання вогнезахисту у вигляді просочувальних розчинів, оскільки площа залишкового перерізу була значно більшою, ніж без його використання. Також вогнезахист у вигляді ПВХ панелі був абсолютно не доцільним, оскільки це легкозаймистий матеріал.

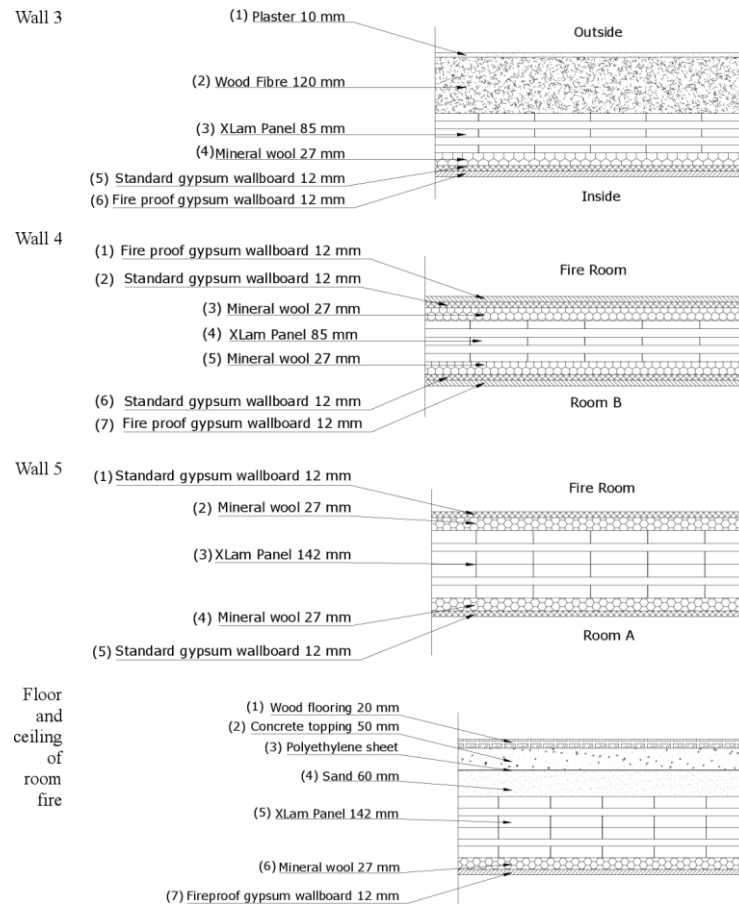


Рис. 1.11. Конструкції перекриття та стін у випробуванні [48].

У роботі [50] було проведено випробування реальних пожеж на моделях зменшеного масштабу. Дане дослідження надало результати із вивчення динаміки розвитку пожежі на моделях зменшених розмірів, що із економічної точки доцільніше, ніж зводити повномасштабну модель. Дані результати були використані для верифікації із CFD. У результаті роботи було виявлено температурно-часові залежності між факторами, що впливають на температурний режим пожежі: пожежне навантаження, розмір приміщення, теплова інерція огорожувальних конструкцій, вентиляцією, щільністю пожежного навантаження та швидкістю піролізу пожежного навантаження. Виявлено, що вигорання пожежного навантаження відбувається з постійною

швидкістю, залежність між швидкістю та часом практично лінійна і не залежить від фази розвитку пожежі.

Разом із проф. Поздєєвим у роботі [52] було проаналізовано вогнестійкість дерев'яних конструкцій з урахуванням реалістичних режимів пожежі. У результаті було проаналізовано глибину обвуглення та підтверджено її залежність від коефіцієнта пустот та густини вогневого навантаження. Запропонований метод визначення обвуглювання базується на температурних параметрах поширення пожежі, що дозволяє із більшою точністю визначати межу вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

Також у роботах проф. Поздєєва [52–56] є чимало напрацювань по роботі дерев'яних конструкцій із вогнезахистом під час пожеж. Так наприклад у [56] було проведено аналіз поведінки колон із вогнезахисним покриттям на основі OSB плит. У досліді також було зроблене важливе припущення, що дроти термопари можуть бути розташовані вздовж ізотерми на відстані не менше 50 мм від вимірювальних термопереходів (в іншому випадку можливе порушення структури самої ізотерми). Дане припущення підтвердилось експериментально так і теоретично.

Важливий вклад в дослідження вогнестійкості зробив проф. Демчина [57–60]. У роботі [57] розроблена математична модель оцінки межі вогнестійкості просторових одно- та багат шарових конструктивних систем будівель при сумісній дії силових та теплових полів із урахуванням змін властивостей матеріалів в залежності від рівня температури. Створено інженерний метод розрахунку на основі обчислювального комплексу ПК КОЛДЕМ, що дає можливість розрахунковим шляхом визначити межу вогнестійкості великої групи будівельних конструкцій: плит та стінових панелей плоских, пустотних, ребристих, одно- та багат шарових з різним видом обпирання і навантаження. Даний метод дозволяє визначити межу вогнестійкості будівельних просторових конструкцій та вирішити актуальну теоретично-прикладну проблему.

Також під керівництвом проф. Демчина зроблено велика кількість натурних випробувань [58, 59]. У даних робота виконано маломаштабні випробування елементів несучих конструкцій та проведена оцінка та математичні описи моделі горіння конструкцій в умовах реальної пожежі.

Прийнятий в даний час в нормативній і технічній літературі підхід до вирішення проблеми розрахунку дерев'яних колон в умовах підвищених температур має такі недоліки:

1. З його використанням неможливо виконати розрахунок напружено - деформованого стану і проектування колон при їх локальному нагріві.

При цьому в літературі також практично повністю відсутні присвячені даній проблемі експериментальні дані.

2. Відсутні методики розрахунку температурного поля локально-нагрітих дерев'яних колон.

3. Прийнята в даний час для розрахунку напружено-деформованого стану дерев'яних колон гіпотеза плоских перетинів не дозволяє з достатньою точністю розрахувати напруження та деформації при сильній неоднорідності температурних полів (що характерно при локальному нагріві).

4. Повністю відсутні рекомендації підбору теплозахисту на весь період дії підвищеної температури, значення якої відомо заздалегідь.

5. Повністю відсутні рекомендації підбору теплозахисту для наперед заданого часу дії підвищеної температури, значення якої відомо заздалегідь.

Також були зроблені висновки щодо поведінки дерев'яних конструкцій, які знаходяться під впливом підвищених температур і силового навантаження:

1. Деревина одночасно володіє пружними, в'язкими і пластичними властивостями.

2. Ці властивості в значній мірі залежать від вологості і температури деревини.

3. Міцність деревини також значною мірою залежать від вологості і температури деревини.

4. При нагріванні деревини також присутні деформації і напруження, обумовлені її тепловим розширенням.

5. Поширення тепла всередині деревини проходить від шару до шару, тобто є кондуктивним.

6. При високих температурах мають місце специфічні процеси горіння і обвуглювання деревини.

Тому в ході подальших досліджень було розглянуто такі середовища:

- пружне;
- пружно - в'язке;
- пружно- в'язко-пластичне;
- термо-пружне;
- термо-пружно в'язке;
- термо-пружно-в'язко-пластичне.

### 1.3. МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ ГОРІННЯ

#### 1.3.1. РІВНЯННЯ РІВНОВАГИ І СТАНУ РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩ, ЩО ДОЗВОЛЯЮТЬ ПРОГНОЗУВАТИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН. ГРАНИЧНІ І ПОЧАТКОВІ УМОВИ.

Вище (п.1.1.1) було встановлено, що деревина одночасно володіє пружними, в'язкими і пластичними властивостями, ці властивості залежать від вологості і температури і при цьому деревина є анізотропним матеріалом.

У цьому розділі представлені рівняння рівноваги і стану, що дозволяють прогнозувати напружено-деформований стан перерахованих вище середовищ.

У всіх випадках розглянута ліва декартова система координат (рис. 1.12) і рівняння рівноваги і стану в переміщеннях [61, 62]. Такий вибір був зроблений тому, що при використанні рівнянь рівноваги в переміщеннях необхідно використовувати додаткові співвідношення - так звані умови нерозривності.

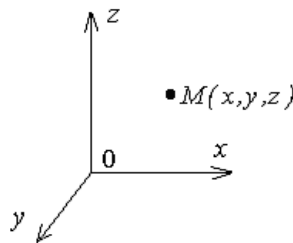


Рис.1.12 Ліва декартова система координат

Іншими словами, метод використання рівнянь рівноваги і стану в переміщеннях є більш простим, ніж при використанні рівнянь рівноваги і стану в напруженнях.

1. Пружне середовище. В цьому випадку рівняннями стану є узагальнений закон Гука [62–66]. Тому для опису напружено - деформованого стану дерев'яних конструкцій з використанням розрахункової моделі пружного ізотропного середовища слід використовувати наступне співвідношення:

$$\left. \begin{aligned}
 G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} &= \rho \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}; \\
 G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} &= \rho \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}; \\
 G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} &= \rho \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}; \\
 \sigma_{xx} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e; \\
 \sigma_{yy} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e; \\
 \sigma_{zz} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e; \\
 \tau_{xy} = \tau_{yx} &= G \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right); \\
 \tau_{xz} = \tau_{zx} &= G \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \\
 \tau_{yz} = \tau_{zy} &= G \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right); \\
 \varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}; \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y}; \\
 \varepsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}; \\
 e &= \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}; \\
 \gamma_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}; \\
 \gamma_{xz} = \gamma_{zx} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}; \\
 \gamma_{yz} = \gamma_{zy} &= \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}.
 \end{aligned} \right\} (1.23)$$

де,  $U$ ,  $V$  и  $W$  - переміщення в напрямку координатних осей  $x$ ,  $y$  і  $z$  відповідно;

$\lambda$  і  $G$  - константи Ламе для деревини;

$\rho$  - щільність;

$e$  - об'ємна відносна деформація;

$\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  і  $\sigma_{zz}$  - нормальні напруження, що діють в напрямку координатних осей  $x$ ,  $y$  і  $z$  відповідно;

$\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ , і  $\tau_{yz}$  - дотичні напруження, що діють в площиннах  $xy$ ,  $xz$  і  $yz$  відповідно;

$\rho$  - щільність деревини;

$\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  і  $\varepsilon_z$  - нормальні деформації в напрямку осей  $x$ ,  $y$  і  $z$ ;

$\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$  і  $\gamma_{yz}$  - деформації зсуву відповідно;

$t$ ; - час;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  - оператор Лапласа в декартовій системі координат.

Рівняння (1.23) описують рух пружного ізотропного середовища в декартовій системі координат.

Підставивши в (1.23) щільність деревини рівну нулю, ми отримаємо систему рівнянь, яка описує напружено - деформований стан пружного невагомго лінійного ізотропного середовища [62, 63, 67]:

$$\left. \begin{aligned} G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} &= 0; \\ G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} &= 0; \\ G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} &= 0; \\ \sigma_{xx} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e; \\ \sigma_{yy} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e; \\ \sigma_{zz} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e; \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= G \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right); \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= G \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= G \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right); \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}; \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y}; \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}; \\ e &= \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}; \\ \gamma_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}; \\ \gamma_{xz} = \gamma_{zx} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}; \\ \gamma_{yz} = \gamma_{zy} &= \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}. \end{aligned} \right\} (1.24)$$

де,  $U, V, W, \lambda, e, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  - див. пояснення до рівнянь (1.23)

Рівняння (1.24) отримали широке застосування при розрахунку дерев'яних конструкцій [8, 68–75].



Для врахування повзучості різних матеріалів (в тому числі, деревини) використовують різні варіанти співвідношень Вольтера - Больцмана [67, 76–79].

$$\left. \begin{aligned} \tilde{G} \cdot \Delta U + (\tilde{\lambda} + \tilde{G}) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} &= 0; \\ \tilde{G} \cdot \Delta V + (\tilde{\lambda} + \tilde{G}) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} &= 0; \\ \tilde{G} \cdot \Delta W + (\tilde{\lambda} + \tilde{G}) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} &= 0; \\ \sigma_{xx} &= 2 \cdot \tilde{G} \cdot \varepsilon_x + \tilde{\lambda} \cdot e; \\ \sigma_{yy} &= 2 \cdot \tilde{G} \cdot \varepsilon_y + \tilde{\lambda} \cdot e; \\ \sigma_{zz} &= 2 \cdot \tilde{G} \cdot \varepsilon_z + \tilde{\lambda} \cdot e; \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \tilde{G} \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right); \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \tilde{G} \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \tilde{G} \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right); \\ \varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial W}{\partial z}; \\ \gamma_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}; \\ \gamma_{xz} = \gamma_{zx} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}; \\ \gamma_{yz} = \gamma_{zy} &= \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}; \\ e &= \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}; \end{aligned} \right\} (1.25)$$

де  $U, V, W, \lambda, G, e, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  - див. пояснення до рівнянь (1.23);

$\tilde{\lambda}$  і  $\tilde{G}$  - інтегральні оператори виду:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\lambda} \cdot y(t) &= \lambda \cdot \left[ y(t) - \int_0^t R(t, \tau) \cdot y(\tau) \cdot d\tau \right]; \\ \tilde{G} \cdot y(t) &= G \cdot \left[ y(t) - \int_0^t R(t, \tau) \cdot y(\tau) \cdot d\tau \right]; \\ \frac{y(t)}{\tilde{\lambda}} &= \frac{1}{\lambda} \cdot \left[ y(t) + \int_0^t K(t, \tau) \cdot y(\tau) \cdot d\tau \right]; \\ \frac{y(t)}{\tilde{G}} &= \frac{1}{G} \cdot \left[ y(t) + \int_0^t K(t, \tau) \cdot y(\tau) \cdot d\tau \right]. \end{aligned} \right\} (1.26).$$

де,  $y(t)$  - функція часу;

$K(t, \tau)$  - ядро повзучості деревини (в загальному випадку - довільного матеріалу);

$R(t, \tau)$  - резольвента ядра повзучості;

$\lambda, G, t$  - див. пояснення до формул (1.23);

$\tau$  - параметр, що має розмірність часу.

Співвідношення (1.25) і (1.26) знайшли широке використання при прогнозуванні деформацій пластмасових, бетонних, залізобетонних і дерев'яних конструкцій, а також ґрунтів та інших матеріалів [78, 79].

Для розрахунку дерев'яних конструкцій співвідношення (1.25) і (1.26) були використані, зокрема, для визначення осьового критичного навантаження на дерев'яний стрижень при розрахунку повзучості деревини (аналог задачі Ейлера).

Також в [79] запропоновано враховувати пластичні та в'язкі деформації шляхом використання ядер повзучості, які мають таку структуру:

$$K(t, \tau) = K_1(t - \tau) + K_2(\tau), \quad (1.27)$$

де  $K_1(t - \tau)$  - частина ядра повзучості, що описує запізнілі в часі деформації, які повністю відновлюються при знятті навантаження, тобто в'язкі деформації;

$K_2(\tau)$  - частина ядра повзучості, що описує запізнілі в часі і повністю незворотні деформації після зняття навантаження, тобто пластичні деформації.

Для врахування деформацій і напружень, що обумовлені зміною об'єму при нагріванні (охолодженні) різних матеріалів, використовують теорію термопружності, в якій в якості рівнянь використані рівняння Дюамеля-Неймана [62, 80–91].

У цьому випадку рівняння рівноваги стану мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 G \cdot \Delta U + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x} &= (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial(T - T_0)}{\partial x}; \\
 G \cdot \Delta V + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial y} &= (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial(T - T_0)}{\partial y}; \\
 G \cdot \Delta W + (\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} &= (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot \frac{\partial(T - T_0)}{\partial z}; \\
 \sigma_{xx} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_x + \lambda \cdot e - (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot (T - T_0); \\
 \sigma_{yy} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_y + \lambda \cdot e - (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot (T - T_0); \\
 \sigma_{zz} &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_z + \lambda \cdot e - (3 \cdot \lambda + 2 \cdot G) \cdot (T - T_0); \\
 \tau_{xy} = \tau_{yx} &= G \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right); \\
 \tau_{xz} = \tau_{zx} &= G \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right); \\
 \tau_{yz} = \tau_{zy} &= G \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right); \\
 \varepsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}; \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y}; \\
 \varepsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}; \\
 e &= \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}; \\
 \gamma_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}; \\
 \gamma_{xz} = \gamma_{zx} &= \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}; \\
 \gamma_{yz} = \gamma_{zy} &= \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}.
 \end{aligned} \right\} (1.28)$$

де,  $U, V, W, \lambda, G, e, \sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  - див. пояснення до формул (1.23);

$T$  і  $T_0$  - поточне і початкове значення температури відповідно.

Якщо термопружне середовище має властивість повзучості і пластичності, то матеріальні константи Ламе  $\lambda$  і  $G$  слід замінити відповідними їм інтегральними операторами (1.26).

Рівності (1.23) - (1.28) дозволяють прогнозувати напружено-деформований стан середовищ, в яких деформаційні властивості не залежать від температури.

У зв'язку з цим, представляють інтерес аналогії: температурно - тимчасові, напружено - тимчасові і волого - тимчасові [92, 93], суть яких полягає в тому, що для опису процесів деформування полімерів використовуються матеріальні константи, які параметрично залежать від температури. Цей підхід також успішно був використаний при вирішенні задач геомеханіки і механіки ґрунтів.

Розглянуті вище співвідношення цілком прийнятні для опису напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій при їх нагріванні. Однак для їх реалізації необхідно знати розподіл температури за об'ємом колони, початкові і граничні умови, а також умови на контакті шарів конструкції (останнє необхідно для розрахунку колон з теплозахистом).

Також треба відзначити, що представлені вище рівняння рівності та стану (1.23) і (1.28) мають складний і громіздкий вигляд. Тому важливо досліджувати можливість застосування наближених методів розрахунку температурних полів і напружено-деформованого стану при локальному нагріванні колон. Матеріали цих досліджень викладені в розділі 1.3.2.

### **1.3.2. РІВНЯННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ. ПОЧАТКОВІ І ГРАНИЧНІ УМОВИ. МЕТОДИ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РІТЦА.**

Відповідно до сучасних уявлень про природу поширення тепла, розрізняють три основних види теплопередачі в щільних середовищах (в тому числі в деревині):

- кондуктивний;
- конвективний;
- радіаційний (тобто теплопередачу випромінюванням).

У щільних середовищах має місце кондуктивний механізм теплопередачі. Тому конвективний і радіаційний механізми теплопередачі в подальшому розглядатися не будуть.

Для опису кондуктивного типу теплопередачі в щільних середовищах застосовують закон Фур'є, який має вигляд:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dF \cdot dt, \quad (1.29)$$

де,  $dQ$  - кількість теплоти, що проходить за час  $dt$  через елемент поверхні  $dF$  по нормалі до неї;

$\frac{\partial T}{\partial n} = \text{grad}(T)$  - температурний градієнт;

$T$  - температура;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопередачі;

$t$  - час.

Необхідно щоб виконувались такі умови:

- по теплофізичних властивостях, середовище є однорідним та ізотропним;

- теплофізичні властивості цього середовища не залежать від температури.

У цьому випадку рівняння поширення тепла за рахунок кондуктивної теплопередачі має вигляд:

$$a \cdot \Delta T = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1.30)$$

де,  $a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c}$  - коефіцієнт теплопровідності [39];

$\Delta = \nabla^2$  - оператор Лапласа;

$\gamma$  - питома вага деревини;

$c$  - питома теплоємність деревини.

У розгорнутому вигляді, в декартовій системі координат, рівняння теплопровідності має вигляд:

$$a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.31)$$

де,  $x, y, z$  - координати;

$t$  - час.

Далі розглянемо найбільш поширені в практиці теплофізичних розрахунків, граничні умови:

1. Умова Діріхле:

$$T_W = f(x, y, z, t). \quad (1.32)$$

2. Умова Неймана:

$$\frac{\partial T_W}{\partial n} = f_1(x, y, z, t). \quad (1.33)$$

$\partial e$ ,  $T_W$  - температура на межі контакту повітря з колоною;

$\frac{\partial T_W}{\partial n}$  - похідна від температури по нормалі до межі контакту;

$f(x, y, z, t)$  і  $f_1(x, y, z, t)$  - функції координат  $x, y, z$ ;

$t$  - час;

$\alpha$  - коефіцієнт теплопередачі;

$T_w$  - температура твердої поверхні (тобто межі дерев'яної колони);

$T_f$  - температура рідини (або газу), що знаходиться в контакті зі стінкою.

У загальному випадку коефіцієнт  $\alpha$  є функцією багатьох змінних:

$$\alpha = f(W, T_w, T_f, \lambda, \mu, \rho, c, L_1, L_2, \dots), \quad (1.34)$$

де,  $W$  - швидкість руху повітря;

$\mu$  - коефіцієнт в'язкості повітря;

$\rho$  - щільність повітря;

$L_1$  і  $L_2$  - характерні розміри, що визначають умови руху рідини (газу).

При розрахунку температурних полів в пошарових конструкціях слід забезпечити на контакті сусідніх шарів, рівність температур та їх градієнтів (умови ідеального термомеханічного контакту). Математичне відображення цих умов має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T_1(x, y, H, t) - T_2(x, y, H, t) &= 0; \\ \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} - \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=H} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

де,  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  - коефіцієнти теплопередачі шарів матеріалу;

$T_1(x, y, H, t)$  і  $T_2(x, y, H, t)$  - температура на контакті шарів з різними властивостями на відстані  $H$ ;

$x, y, z$  - координати;

$t$  - час.

Далі розглянемо початкову умову для температурного поля. У загальному випадку вона має вигляд:

$$T(x, y, z, 0) = F(x, y, z), \quad (1.36)$$

де,  $F(x, y, z)$  - функція координат, що характеризує розподіл температури в конструкції в початковий момент часу.

Зазвичай в практичних розрахунках приймають

$$T(x, y, z, 0) = \text{const} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1.37)$$

Далі розглянемо граничні і початкові умови, необхідні для визначення напружено - деформованого стану будівельних конструкцій.

Розглянемо граничні умови, які поділяють на три типи [62, 94].

До першого типу відносять граничні умови при зсувах (або при переміщеннях):

$$\left. \begin{array}{l} U_i \Big|_{\Omega} = f_{1,i}(x_1, x_2, x_3, t); \\ i = 1, 2, 3. \end{array} \right\}. \quad (1.38)$$

Умова рівняння означає, що переміщення  $U_i$  на межі області  $\Omega$ , що розглядається, можуть бути представлені у вигляді наперед заданої (тобто заздалегідь відомої) функції  $f_{1,i}(x_1, x_2, x_3, t)$  координат  $x_1, x_2, x_3$  і часу  $t$ .

До другого типу відносять граничні умови для напружень:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{ij} \Big|_{\Omega} n_i = T_i(x_1, x_2, x_3, t); \\ i = 1, 2, 3. \end{array} \right\}. \quad (1.39)$$

$n_i$  - направляючі косинуси.

Умова рівняння означає, що сума проєкцій, прикладених до межі області  $\Omega$ , напружень  $\sigma_{ij}$  на вісь  $x_i$  можуть бути представлені у вигляді наперед заданої (тобто заздалегідь відомої) функції  $T_i(x_1, x_2, x_3, t)$  координат  $x_1, x_2, x_3$  і часу  $t$ .

До третього типу відносять змішані граничні умови, в яких частково відомі напруження, що діють на межі розрахункової області, а частково - переміщення межі.

Рівняння, які на сьогоднішній день широко використовуються для визначення напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, мають складний вигляд. Тому при прийнятті практичних завдань з їх використанням,

виникають значні труднощі. У зв'язку з цим для визначення напружено-деформованого стану будівельних конструкцій використовують різні наближені чисельні методи.

Також широко застосовуються й інші чисельні методи розрахунку (варіаційні, інтегральні і т.д.), в основі яких лежать рівняння варіаційних принципів [62, 63, 94–96].

В основі чисельних методів, як правило, лежить заміна континуальної розрахункової моделі з безперервним розподілом параметрів дискретної моделі, яка має кінцеве значення невідомих, що обираються в залежності від вимог до розрахунку і можливості ЕОМ.

В даний час, поширення серед великої кількості чисельних методів отримав метод скінченних елементів (МСЕ), який є найбільш зручним для реалізації на ЕОМ, завдяки чіткій формалізації окремих етапів розв'язання задачі матричної форми розрахунку [63, 94].

Суть методу полягає в наступному:

1. Область, в якій знаходиться рішення диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеву кількість елементів.
2. У кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції (в найпростішому випадку це поліном першого ступеня).
3. За межами свого елемента, апроксимуюча функція дорівнює нулю.
4. Значення функцій на кордонах елементів (у вузлах) є рішенням задачі і заздалегідь невідоме.
5. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай шукають з умови рівності значень сусідніх функцій на кордонах між елементами (у вузлах). Потім ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів.
6. Складається система лінійних алгебраїчних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, на яких знаходиться рішення вихідної системи, прямо пропорційній кількості елементів і обмежується тільки можливостями ЕОМ. Так як кожен з елементів пов'язаний з обмеженою



кількістю сусідніх, система лінійних алгебраїчних рівнянь має розріджений вигляд, що істотно спрощує її вирішення.

Іншими словами, суть методу скінченних елементів полягає в наступному:

1. Формуються матриці жорсткості (або матриці Діріхле) і мас.
2. Формуються вектори, що підлягають визначенню невідомих зусиль на кордонах між елементами (тобто в вузлах) і вільних членів.

3. Далі на ці матриці накладаються граничні умови (наприклад, якщо мають місце умови Неймана, то матриці залишаються незмінними, а при умовах Діріхле, з матриць викреслюються рядки і стовпці, що відповідають граничним вузлам, оскільки з крайових умов значення відповідних компонент рішення відомо заздалегідь).

4. Після цього формується система лінійних алгебраїчних рівнянь, яка вирішується одним з відомих методів.

З точки зору обчислювальної математики метод кінцевих елементів відноситься до варіаційних задач.

В даний час найбільш широкого застосування в Україні отримав розрахунковий комплекс «Ліра», який дозволяє враховувати такі особливості середовищ:

- пружні;
- пластичні;
- фізичну нелінійність матеріалу;
- геометричну нелінійність;
- анізотропність;
- термopужні властивості.

У зв'язку з цим, цей комплекс був використаний при виконанні подальших досліджень.

Далі досліджуємо можливість визначення температури в дерев'яній колоні з використанням наближених методів. Найбільш прийнятним є метод

Рітца - прямий метод знаходження приблизного рішення крайових задач варіаційного числення [63, 94].

Метод передбачає вибір пробної функції, яка має мінімізувати певний функціонал, у вигляді суперпозиції відомих функцій, які задовольняють граничні умови. При цьому задача зводиться до пошуку невідомих коефіцієнтів суперпозиції.

Просторовий оператор на операційному рівнянні, який описує крайову задачу, повинен бути лінійним, симетричним і позитивно-визначеним.

Метод Рітца застосовується для вирішення завдань варіаційного обчислення прямим методом. За допомогою прямих методів вирішуються вихідні завдання по знаходженню функції в заданому класі, які встановлюють екстремальне значення заданому функціоналу [63, 94].

Основні положення методу Рітца по знаходженню функції повинні бути сформульовані у варіаційній формі.

1. Рішення повинно бути представлено у вигляді кінцевого лінійного ряду, який має вигляд:

$$u(x) \approx \varphi_0(x) + \sum_{i=1}^n c_i \cdot \varphi_i(x), \quad (1.40)$$

де,  $\varphi_0(x)$  - відома функція, яка точно задовольняє граничним умовам;

$\varphi_i(x)$  - лінійно-незалежні функції, що задовольняють нульовим граничним умовам (пробні функції),

$c_i$  - коефіцієнти, які необхідно визначити в результаті виконання завдання.

2. До рівняння (1.40) застосовується оператор:

$$L\{u(x)\} \approx L\{\varphi_0(x)\} + \{\sum_{i=1}^n c_i \cdot \varphi_i(x)\} = 0. \quad (1.41)$$

3. Знаходження внутрішніх перетворень пробних функцій на перевірочні функції, які в матричній формі мають такий вигляд:

$$|A_{ij}| \cdot \vec{c}_i = \vec{b}_i, \quad (1.42)$$

де,  $|A_{ij}|$  - матриця - скаляр, елементи якої слід визначати за формулами

$$A_{ij} = \int_{x_1}^{x_2} \varphi_j(x) \cdot \psi_i(x) \cdot dx;$$

$\vec{b}_i$  - вектор, елементи якого слід визначати за формулами  $b_i = \int_{x_1}^{x_2} \varphi_0(x) \cdot \psi_i(x) \cdot dx$ ;  $\vec{c}_i$  - вектор невідомих.

4. Система рівнянь (1.37) вирішується одним з відомих методів.

Викладені в цьому підрозділі матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. Розглянуто рівняння теплопровідності, початкові і граничні умови, необхідні для розрахунку температурних полів в локально - нагрітих дерев'яних колонах, а також умови «склеювання» шарів матеріалами з різними властивостями.

2. Проаналізовано початкові і граничні умови, необхідні для розрахунку температурних полів напружено-деформованого стану локально-нагрітих дерев'яних колон.

3. Показано, що для визначення напружено-деформованого стану локально-нагрітих дерев'яних колон при обліку пружних та термопружних деформацій і напружень, а також анізотропії, фізичної та геометричної нелінійності доцільно використовувати техніку розрахунку кінцевих елементів.

4. Встановлено що для розрахунку температурних полів в дерев'яних локально - нагрітих колонах доцільно використовувати варіаційний метод Рітца.

#### 1.4. ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1.

Викладені в першому розділі матеріали досліджень дозволили зробити наступні висновки:

1. Прийнятий в нормативній і технічній літературі підхід до вирішення проблеми розрахунку дерев'яних колон, в умовах підвищених температур, має такі недоліки:

1.1. З його використанням неможливо виконувати розрахунок напружено-деформованого стану і проектування колон при їх локальному нагріві.

При цьому, в літературі також практично повністю відсутні присвячені даній проблемі експериментальні дані.

1.2. Відсутні методики розрахунку температурного поля локально - нагрітих дерев'яних колон.

1.3. Прийнята для розрахунку напружено - деформованого стану дерев'яних колон, гіпотеза плоских перетинів, не дозволяє з достатньою точністю розрахувати напруження та деформації при сильній неоднорідності температурних полів (що характерно при локальному нагріві).

1.4. Повністю відсутні рекомендації по підбору вогнезахисту на весь період дії підвищеної температури, значення якої відомо заздалегідь.

1.5. Повністю відсутні рекомендації по підбору теплозахисту для наперед заданого часу дії високої температури на колону, значення якої відомо заздалегідь.

2. При дії підвищених температур і силового навантаження, дерев'яні конструкції виявляють такі особливості деформацій:

2.1. Деревина одночасно володіє пружними, в'язкими та пластичними властивостями.

2.2. Ці властивості в значній мірі залежать від вологості і температури деревини.

2.3. Міцність деревини також значною мірою залежать від вологості і температури деревини.

2.4. При нагріванні деревини, мають місце деформації і напруження, що обумовлені її тепловим розширенням.

2.5. Поширення тепла всередині деревини походить від шару до шару, тобто кондуктивним способом.

2.6. При високих температурах мають місце специфічні процеси горіння і обвуглювання деревини.

3. З огляду на різновид властивостей деревини, необхідно виконати наступні експериментальні дослідження стиснутих осьовим навантаженням та локально нагрітих колон:

3.1. Визначення властивостей матеріалу дерев'яних колон.

3.2. Визначення напружено - деформованого стану стиснутих осьовим навантаженням колон при нормальній (20 °C) температурі.

3.3. Визначення напружено - деформованого стану стиснутих осьовим навантаженням та локально нагрітих колон без вогнезахисту, при дії високих температур.

3.4. Визначення напружено - деформованого стану стиснутих осьовим навантаженням та локально нагрітих колон з вогнезахистом при дії високих температур.

4. Встановлено, що для визначення напружено-деформованого стану локально - нагрітих дерев'яних колон при обліку пружних та термопружних деформацій і напружень, а також анізотропії, фізичної та геометричної нелінійності, доцільно використовувати метод розрахунку кінцевих елементів.

5. Встановлено, що для розрахунку температурних полів в дерев'яних локально - нагрітих колонах, доцільно використовувати варіаційний метод Рітца.

## РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄМ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Відповідно до поставленої мети та задач досліджень було розроблено програму експериментальних досліджень деревини та моделей дерев'яних колон, яка представлена в табл.2.1.

Загалом було проведено шість серій лабораторних випробувань та один натурний експеримент в умовах реальної пожежі:

- У серії I були виконані випробування деревини, а у серії IV - колон на центральний стиск, за результатами яких було отримано дані для визначення міцності деревини та її модуля пружності на стиск, а також несучої здатності колон при нормальній температурі  $20 \pm 2$  °C.

- У серії II були виконані випробування деревини на осьовий розтяг, за результатами яких було отримано дані для визначення міцності деревини та її модуля пружності на розтяг при нормальній температурі  $20 \pm 2$  °C.

- У серії III були виконані випробування деревини на згин, в ході яких було отримано дані для визначення міцності деревини на згин при нормальній температурі  $20 \pm 2$  °C.

- При проведенні випробувань колон серій V та VI, вони були випробувані на дію поздовжнього навантаження та локального впливу високих температур з незахищеною деревиною, а також з вогнезахистом. В ході випробувань були поставлені наступні задачі:

- визначення несучої здатності та часу до руйнування конструкції;
- визначення деформацій у досліджуваних перерізах та поздовжніх відхилень колон;
- визначення розподілу температури всередині досліджуваних перерізів дерев'яних колон.

- VII серія випробувань була проведена в умовах реальної пожежі в рамках програми досліджень будівельних конструкцій (дерев'яної рами) на полігоні Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

В ході випробувань дерев'яної рами в умовах пожежі, були поставлені наступні задачі:

- визначення швидкості горіння деревини;
- визначення ефективності вогнезахисту гіпсокартонними листами різних поверхонь дерев'яної рами.

Зразками, які були випробувані у серії IV, V та VI - являлися дощатоклеєні колони перерізом 10х10см, довжиною 100см.

На першому етапі були відпрацьовані технологія виготовлення зразків колон і методика їх випробування.

На другому етапі були виконані дослідження несучої здатності колон та вивчення напружено-деформованого стану їх при центральному стиску.

Ці колони були виготовлені з дошок завтовшки  $2,5 \pm 0,05$  см, склеєних по довжині з окремих фрагментів за допомогою шипових з'єднань.

При цьому було використано загальновідому технологію склеювання деревини, суть якої полягала у наступному:

1. Елементи колони, а саме окремі дошки довжиною 100 см , шириною  $10 \pm 0,1$  см та завтовшки  $2,5 \pm 0,05$  см підганялися один до одного таким чином, щоб товщина пакету з чотирьох дошок дорівнювала  $10,1 \pm 0,1$  см і не було накладання шипових з'єднань в одному перерізі.

2. Далі на окремі елементи колони наносився клей.

3. Після цього пошарово збиралася конструкція.

4. Потім дошки, що склеювалися, стискали за допомогою струбцин з тиском  $1,0 \pm 0,1$  МПа.

5. У такому стані конструкція витримувалася 2 доби.

6. Після закінчення склеювання струбцини знімалися і колона для забезпечення релаксації напружень зберігалася протягом 3-5 тижнів при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

7. Також були вирізані окремі зразки (серії I... III) з дошок для випробувань на міцність деревини.

Таблиця 2.1.

## Склад та задачі виконаних експериментальних досліджень

Серія	Марка зразка	Кількість, шт.	Навантаження N, кН або вид випробування	Вид навантаження	Задачі досліджень	Примітки
1	2	3	4	5	6	7
I	C-1- C-8	8	До руйнування	Центральний стиск	Визначення міцності деревини на стиск	-
II	P-1- P-8	8	До руйнування	Центральний розтяг	Визначення міцності та деформативності деревини на розтяг	
III	Зг-1- Зг-8	8	До руйнування	Згин	Визначення міцності деревини на згин	
IV	K1.1- K1.5	5	До руйнування	Центральний стиск	Визначення несучої здатності колон та вивчення напружено-деформованого стану при центральному стиску. Визначення деформативності деревини на стиск	
V	K-2.1- K 2.6	6	90	Центральний стиск та локальний нагрів	Визначення несучої здатності та деформацій зразка до і під час дії локального нагріву	Без захисного покриття
VI	K-3.1- K-3.4	4	90	Центральний стиск та локальний нагрів	Розподіл температури в об'ємі зразка під час дії локального нагріву	З захисним покриттям
VII	PM-1	1	Власна вага	Натурне випробування в умовах реальної пожежі	Швидкість горіння незахищеної деревини. Ефективність вогнезахисного покриття з гіпсокартонних листів	



## **2.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ ПРИ НОРМАЛЬНІЙ ТЕМПЕРАТУРІ**

Випробування дослідних зразків, в умовах нормальної температури, необхідні для визначення початкових значень міцності і модуля пружності деревини дощатоклеєних колон.

При виконанні досліджень, описаних в підрозділі 2.1, була поставлена мета отримати результати, необхідні для визначення несучої здатності і деформацій колон при нормальних температурах (20 °С), а також початкових значень розрахункової міцності і модулів пружності, що входять у відомі залежності цих властивостей від температури [8]

Ці дані необхідні для виконання теоретичних досліджень з використанням представлених в ДСТУ [8] даних та графіків залежності властивостей деревини від температури і отриманих формул (4.1), (4.2).

Для виготовлення дослідних зразків було використано деревину першого сорту, яка не мала сучків, гнилі та інших природніх вад.

Вологість деревини дорівнювала  $10 \pm 1\%$ .

Для отримання заданої вологості, деревина зразків витримувалась при постійній вологості повітря протягом 6 – 8 місяців.

Склеювання деревини здійснювалось за допомогою клеїв Titebond Original Wood Glue.

### **2.1.1 ВИПРОБУВАННЯ І СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА СТИСК**

Для визначення міцності деревини на стиск (перша серія випробувань) було випробувано стандартні зразки, вирізані з суцільної деревини у формі призми, згідно [97]. На дію стискаючих зусиль було випробувано 8 дослідних зразків дерев'яних кубиків, розмірами 20x20x30 мм, волокнами вздовж дії навантаження.

Загальний вигляд та схема зразків, що випробовувались на стиск, представлено на рис. 2.1.

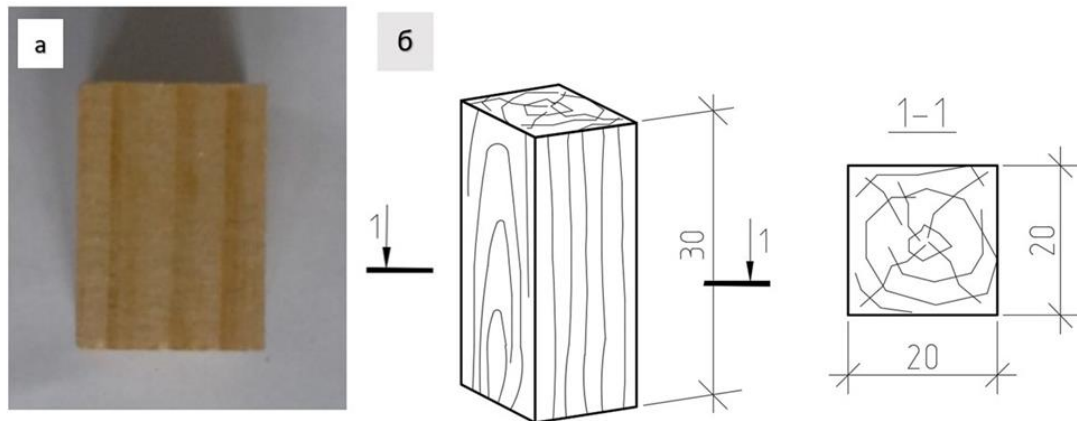


Рис. 2.1. Дослідний зразок для випробування на стиск; а) загальний вигляд зразка; б) схема. зразка.

Випробування дослідних зразків на стиск виконували в такій послідовності:

1. Розміри зразків вимірювали з точністю до 0,1 мм.
2. Після цього визначали початкову площу поперечного перерізу кожного зразка  $A_0$ , в  $\text{см}^2$ .
3. Далі, перед випробуванням, зразки фотографували, а геометричні розміри заносили в таблицю випробувань:
  - початкові розміри поперечного перерізу,  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $L_0$ , мм;
  - початкова площа поперечного перерізу зразка,  $A_0$ ,  $\text{мм}^2$ .
4. Визначали вологість зразка за допомогою вологоміра для деревини.
5. Після цього дослідний зразок встановлювали по центру опори і затискали з верхньою плитою випробувальної машини.
6. Швидкість навантаження на стиск вздовж волокон становила 4 мм/хв. При такій швидкості зразок зруйнувався через 0,5-1,5 хвилини після початку навантаження [98].
7. Зразки доводили до руйнування, після чого випробування зупиняли.

## 2.1.2 ВИПРОБУВАННЯ II СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА РОЗТЯГ

Для визначення міцності деревини на розтяг (друга серія випробувань) було випробувано стандартні зразки, вирізані з суцільної деревини у формі «вісімки», згідно [97,99].

На розтяг було випробувано 8 дослідних зразків, з них чотири зразки з клейовим зубчатим швом в робочій зоні і чотири без клейового зубчатого шва (із суцільної деревини). Загальний вигляд та схема цих зразків представлені на рис.2.2.

Випробовування «вісімок» з деревини на розтяг проводилося на розривній машині марки Р-20 (рис. 2.3) з клиновидними захватами, похибка вимірювань становила  $\pm 1\%$ . Для заміру поздовжніх деформацій використовували тензometri Гугенбергера з базою 20 мм і точністю  $\pm 0,001$  мм, що встановлювалися на протилежних сторонах зразків, в одній площині (рис. 2.3).

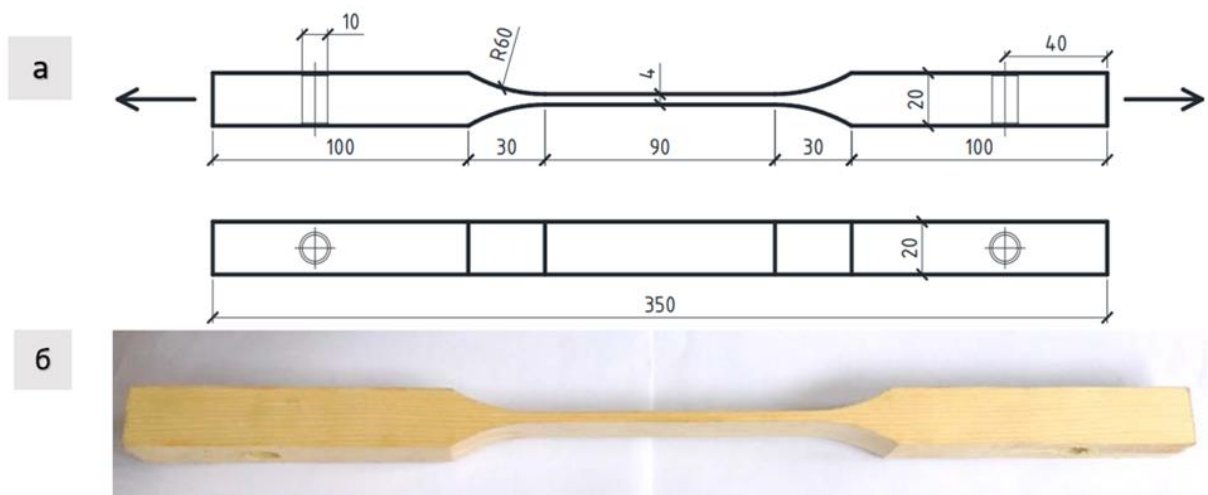


Рис. 2.2. Дослідний зразок «вісімка» для випробування на розтяг;

а) схема зразка; б). загальний вигляд зразка.

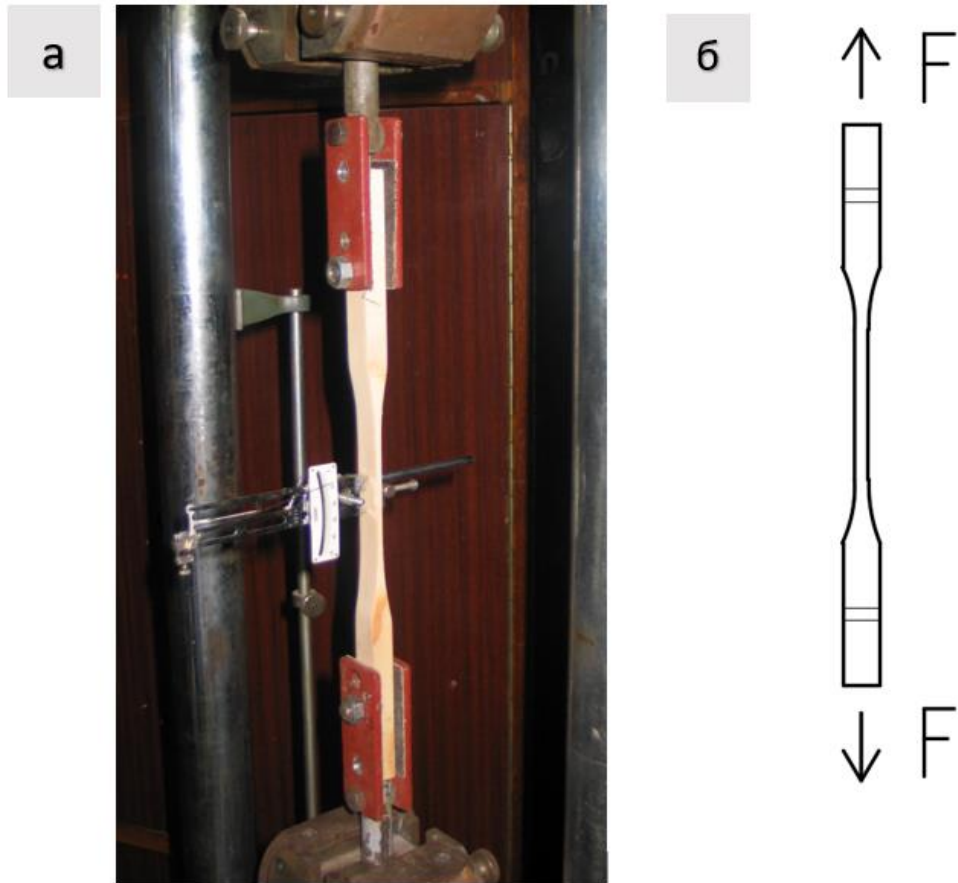


Рис. 2.3. Випробування дерев'яних зразків на розтяг; а) загальний вигляд випробувального стенду; б) схема випробуваного зразка

Випробування дослідних зразків на розтяг виконували в такій послідовності:

1. Розміри зразків вимірювали з точністю до 0,1 мм.
2. Після цього обчислювали початкову площа поперечного перерізу кожного зразка  $A_0$ , в мм<sup>2</sup>.
3. Далі, перед прикладанням навантаження, зразки фотографували, а їх геометричні параметри, записували в таблицю випробувань:
  - початкова ширина та товщина поперечного перерізу зразка  $a$ ,  $b$ , мм;
  - початкова довжина тонкої частини зразка вздовж волокон,  $L$ , мм;
  - початкова площа поперечного перерізу зразка,  $A_0$ , мм<sup>2</sup>.
4. Після цього, дослідний зразок закріплювали в спеціальні лещата з наклеєним на внутрішні сторони абразивним папером для кращої адгезії з деревиною.

Зразок в лещатах було встановлено в розривну машину та виконано перший етап натягу (без затиснених лещат) для центрування. Після цього, лещата затискали болтовим з'єднанням і продовжували випробування.

5. У процесі випробування виконували спостереження за поведінкою зразка, а також виконували побудову діаграми «навантаження (кН) - вертикальна деформація (мм.)».

6. Після руйнування зразка, розривну машину вимикали і випробування припинялося.

### 2.1.3 ВИПРОБУВАННЯ ІІІ СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА ЗГИН

Для визначення міцності деревини на згин було випробувано зразки у формі призми, вирізані з суцільної деревини [97,100]. Для визначення характеристик міцності на згин деревини, було випробувано 5 зразків розмірами 20x20x300 мм на дію згинаючих зусиль (рис. 2.4). Дослідження проводились за допомогою домкрату і гідравлічного пресу П125 (рис. 2.5).

Для чистоти вибірки найбільше та найменше значення руйнівного навантаження відкидалися і для визначення середнього значення руйнівного напруження не враховувалися.

Загальний вигляд та схему цих зразків представлений на рис. 2.4.

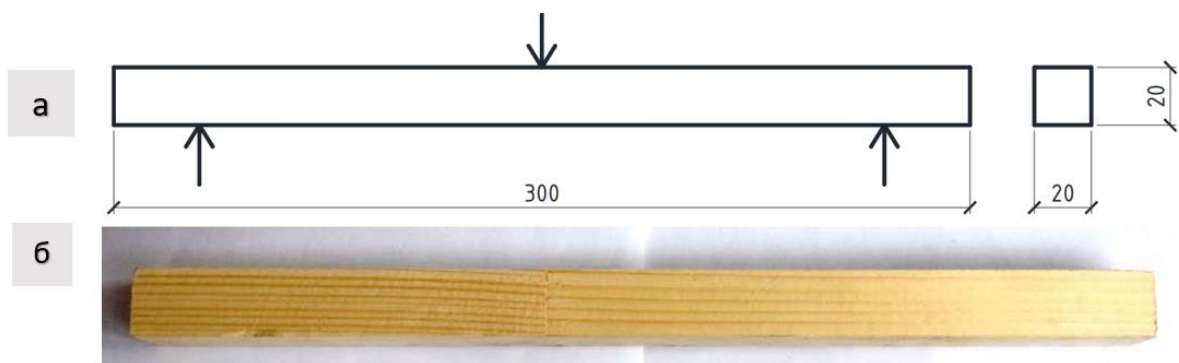


Рис. 2.4. Дослідний зразок для випробування на згин; а) схема зразка; б) загальний вигляд зразка.

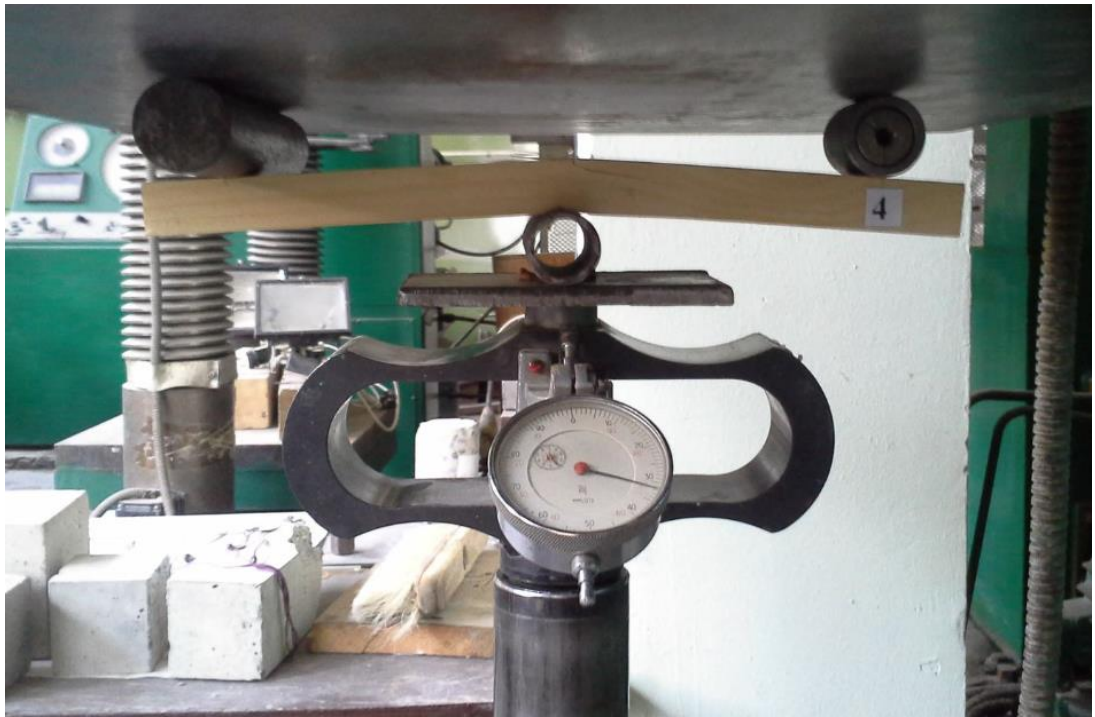


Рис. 2.5. Загальний вигляд стану для випробування дерев'яних зразків на згин;

Випробування дослідних зразків на згин виконували в такій послідовності:

1. Розміри зразків вимірювали з точністю до 0,1 мм.
2. Після цього, обчислювали початкову площу поперечного перерізу кожного зразка  $A_0$ , в мм<sup>2</sup>.
3. Далі, перед початком прикладання навантаження, дослідні зразки фотографували, а також заміряли геометричні параметри, які заносили в таблицю випробувань:
  - початкові розміри поперечного перерізу,  $a$ ,  $b$ ,  $L$ , мм;
  - початкова площа поперечного перерізу зразка,  $A_0$ , мм<sup>2</sup>.
4. Після цього, дослідний зразок встановили на випробувальний прес П125 та чітко по центру зразка прикладали навантаження.
5. Після руйнування зразка випробувальну машину вимикали і випробування припинялося.

## 2.2 ВИПРОБУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН НА СТИСК

Для визначення несучої здатності колон та їх напружено-деформованого стану при центральному стиску, було випробувано п'ять дерев'яних колон четвертої серії. Загальний вигляд та схему цих зразків представлено на рис.2.6.

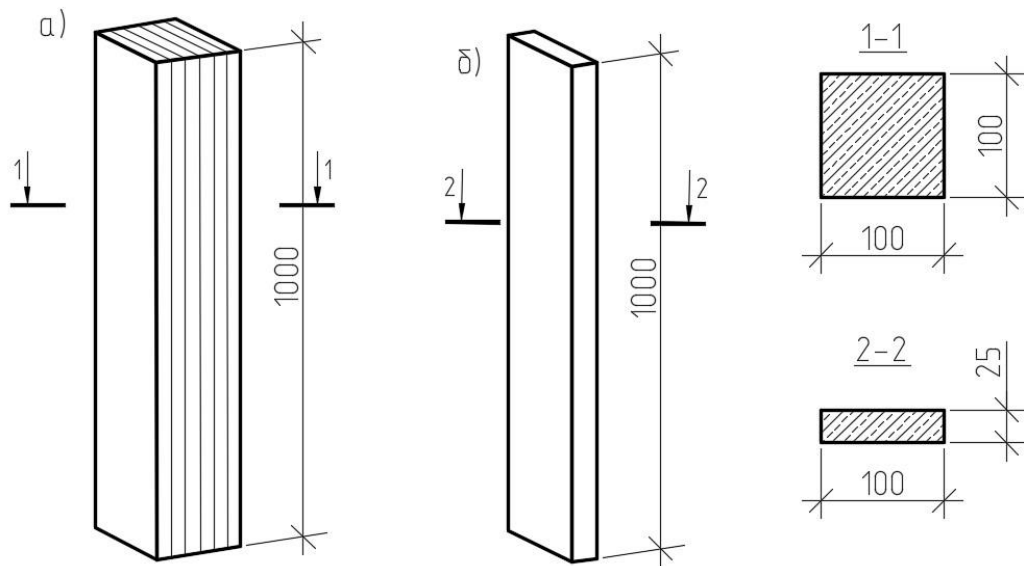


Рис. 2.6. Дослідний зразок дерев'яної клеєної колони, використаний при проведенні четвертої, п'ятої і шостої серій випробувань.

а) готовий виріб; б) - елементи, з яких були виготовлені клеєні колони.

Колони серії IV були випробувані на стенді, загальний вигляд якого представлено на рис. 2.7.

Методика випробувань дерев'яних колон на даному стенді полягала в наступному:

1. Повздовжнє центральне навантаження прикладали на колону 2 через опорні шарніри 3.
2. Навантаження повздовжньою силою здійснювали за допомогою 50-тонного гідравлічного домкрата 4 в комплексі з насосною станцією.
3. Контроль за навантаженням виконували за допомогою попередньо протарованого манометра на насосній станції.
4. Навантаження зразка проводили ступенями по 10 кН з витримкою по 5 хвилин на кожній стадії навантаження. При цьому навантаження за відліком

манометра підтримували постійним від моменту завантаження до кінця витримки на відповідній стадії.

5. Вимірювання повздовжніх деформацій дощатоклеєної колони виконували за допомогою шістьох мікроіндикаторів 5, з базою 200 мм. та точністю вимірювання 0,001 мм. Прилади знімалися та вимірювання припинялося після збільшення нерівномірності в напруженнях з двох протилежних сторін колони (більше 15%) або збільшення вигину колони більше 0,5мм.

6. Деформацію вигину колони вимірювали за допомогою трьох прогиномірів Аістова 6, закріплених біля верхньої та нижньої опори колони, а також по центру колони. Вигин колони фіксувався до завершення експерименту, тобто до руйнування колони.

7. На основі отриманих експериментальних даних було:

- визначено модуль деформації деревини за середнім значенням відносних деформацій в пружній стадії роботи колони;
- побудовані графіки залежностей напружень від навантаження;
- побудований графік залежності вигину колон від навантаження;
- виконані графіки залежності середніх відносних деформацій в перерізі колони від напружень.

8. Експеримент вважався закінченим після повного руйнування колон.



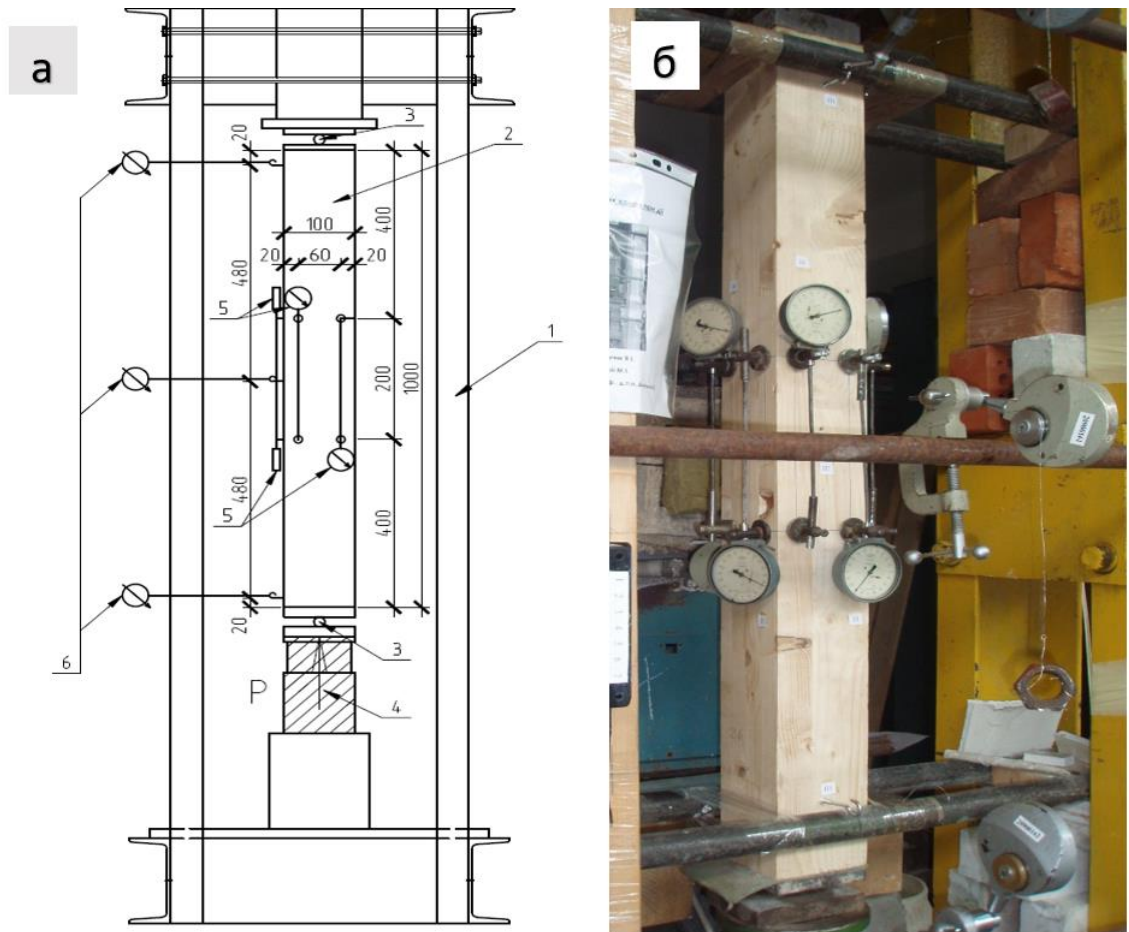


Рис. 2.7. Випробувальний стенд для центрально–стиснутої дощатоклеєної колони на центральний стиск: а) схема стенду: 1-випробувальний стенд, 2-дощатоклеєна колона, 3-опорний шарнір, 4-гідравлічний домкрат, 5-мікроіндикатори, 6- прогиноміри “Аістова”; б) загальний вигляд.

### 2.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВАННІ.

При дослідженні поведінки дерев'яних клеєних колон при їх локальному нагріванні (п'ята серія випробувань) для конструкції без вогнезахисту вирішувалися такі завдання:

- визначення несучої здатності дерев'яних колон при їх локальному нагріванні;
- визначення деформативних характеристик дерев'яних колон при їх локальному нагріванні;
- визначення розподілу температури всередині дерев'яних колон при

їх локальному нагріванні.

Колони серії V були випробувані на міцність при дії однобічного локального нагріву без захисту деревини.

В результаті випробувань, колони було доведено до руйнування.

У процесі випробувань реєструвалися такі параметри:

- вертикальні деформації;
- горизонтальні деформації (вигин);
- температуру на поверхні нагріву;
- температуру у товщі колони.

Загальний вигляд та схема стенду для випробування центрально-стиснутих дощатоклеєних колон при дії локального нагрівання наведено на рис.2.8. Схеми випробування показано на рис.2.9; рис.2.10.

Локальне нагрівання дослідних колон проводилося за допомогою муфельної печі 7, яка попередньо нагрівалася до температури 500<sup>0</sup>С-550<sup>0</sup>С та через спеціально сконструйований перехідник 12 контактувала з боковою поверхнею колони.

Перехідник 12 був виконаний з жорсткої мінеральної вати товщиною 5см таким чином, що нагрів зразка відбувався лише в чітко обмеженій зоні (100мм×100мм). Така конструкція перехідника практично виключала нагрівання інших ділянок колони конвективним теплом, що виділялося з муфельної печі 7.

Нагрівальним елементом муфельної печі служила ніхромова спіраль, яка була розміщена в пазах керамічних пластин печі.

Температура нагрівання печі з точністю  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  регулювалася за допомогою реле, вмонтованого у корпусі печі.

Контроль температури в колоні та печі здійснювався за допомогою хромель-алюмелевих термопар 8 (див.рис.2.10), що були встановлені в тілі та на поверхні колони і в муфельній печі.



Рис. 2.8. Загальний вигляд стенду для випробувань центрально-стиснутої дощатоклеєної колони при дії локального нагрівання.

Покази з термопар вимірювали за допомогою інтелектуального вимірювального перетворювача ПВІ, що переводив дані до персонального комп'ютера 11, який виводив значення температур на екран кожних 5сек.

Вимірювання повздожніх деформацій дощатоклеєної колони проводили за допомогою шістьох мікроіндикаторів 5 з базою 200 мм та точністю вимірювання 0,001 мм. Деформацію вигину колони вимірювали за допомогою трьох прогиномірів Аістова 6, закріплених по центру колони та біля верхньої та нижньої опор колони.

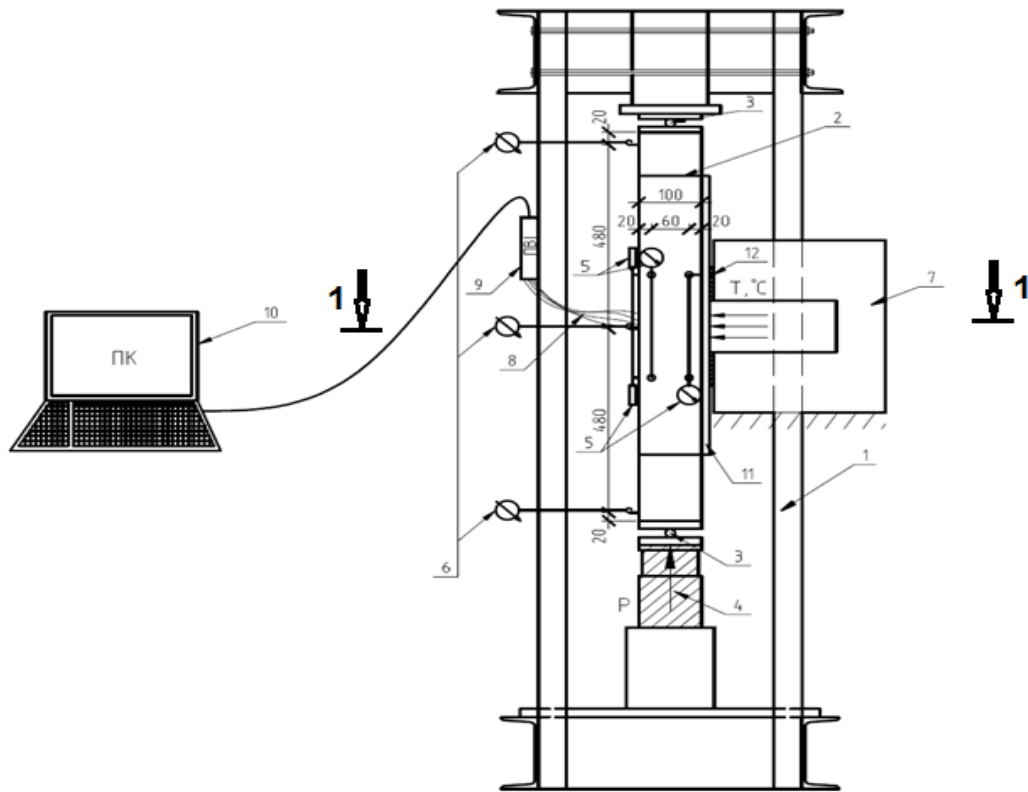


Рис. 2.9. Схема стенду для випробувань центрально-стиснутої дощатоклеєної колони при дії локального нагріву: 1- стенд для випробовування; 2 -дощатоклеєна колона; 3-опорний шарнір; 4 - гідравлічний домкрат; 5 - мікроіндикатори; 6- прогиноміри “Аістова”; 7 - муфельна піч; 8 - хромель-алюмелеві термомпари; 9 - вимірювальний перетворювач ПВІ-0298; 10 - персональний комп’ютер; 11 – гіпсокартон; 12 - перехідник

Випробування центрально-стиснутих дощатоклеєних колон при дії локального нагріву без вогнезахисного покриття проводились в два етапи.

На першому етапі зразки поступово навантажували повздовжньою силою ступенями 10 кН до 90 кН, що відповідала експлуатаційній величині навантаження. В процесі навантаження колон, фіксували повздовжні деформації перерізу колони і прогини на кожному ступені навантаження. Після досягнення величини повздовжньої сили 90 кН, навантаження стабілізували.

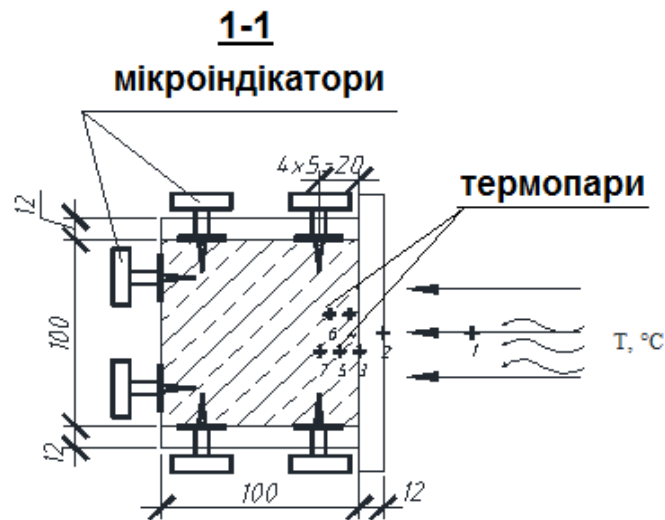


Рис. 2.10. Схема розташування мікроіндикаторів і термопар. Примітка: даний рисунок слід розглядати разом з рис.2.9.

На другому етапі, до колони через перехідник з жорсткої мінеральної вати, приставляли муфельну піч, яка попередньо була розігріта до температури  $500^{\circ}\text{C}$ - $550^{\circ}\text{C}$ . Таким чином джерело нагріву розміщували з однієї сторони колони. Повздовжні деформації деревини на необігрітих поверхнях та вигини колони фіксували кожні 3 хв. При значному збільшенні швидкості наростання деформацій мікроіндикатори були зняті, натомість прогиноміри Аістова залишалися до кінця експерименту. Останні покази з прогиномірів Аістова фіксувалися відеокамерою через надто швидку зміну показників.

Зміну температури спостерігали в режимі реального часу за допомогою вимірювального перетворювача ПВІ-0289, який паралельно архівував інформацію на персональний комп'ютер. Частота зчитування інформації з термопар становила 5 секунд.

Під час локального нагріву колон, підтримували рівень зовнішнього навантаження. Колони доводили до руйнування під дією високої температури при постійному зовнішньому навантаженні 90 кН. Після руйнування колон, піч відставляли, а зону обуглювання деревини охолоджували водою для запобігання продовженню процесу горіння. Після демонтажу колони її розрізали посередині та фіксували глибину обуглювання деревини.

## 2.4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ІЗ ЗАХИСТОМ ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВІ.

Колони серії VI були випробувані на міцність при дії однобічного локального нагріву із використанням вогнезахисту.

Загальний вигляд стану та схема для випробування центрально-стиснутих дощатоклеєних колон при дії локального нагріву з вогнезахистом наведено на рис. 2.11.

Методика випробування колон на центральний стиск при дії однобічного локального нагрівання із використанням вогнезахисту аналогічна, як для випробування колон V серії та описана в п.2.3.

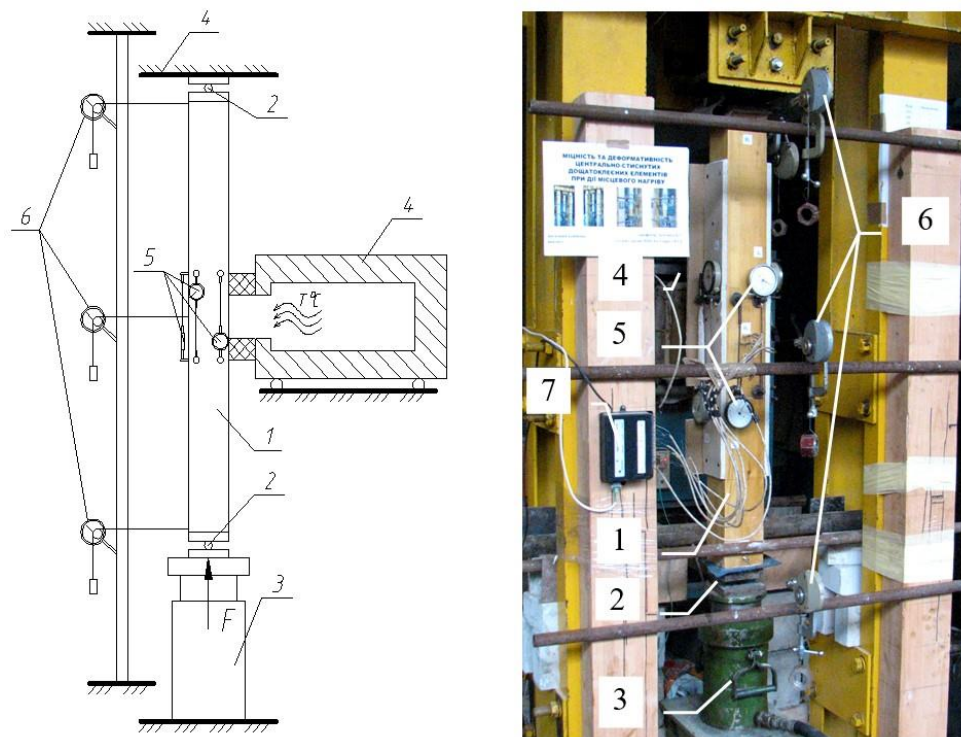


Рис.2.11. Схема і вигляд стану для випробування на вогнестійкість колон із вогнезахистом: 1 – зразок, що випробовується, 2 – опорні шарніри, 3 – гідравлічний домкрат 4 – муфельна піч, 5 – мікроіндикатори, 6 – прогиноміри Аістова, 7– ПВІ-0298.



## 2.5. НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДЕРЕВ'ЯНОЇ РАМИ В УМОВАХ РЕАЛЬНОЇ ПОЖЕЖІ.

Метою натурних випробувань (VII серія) було дослідження поведінки конструкції дерев'яної рами в умовах пожежі (із застосуванням систем вогнезахисту з використанням гіпсокартонних листів), а саме дослідження:

- процесів обвуглювання захищеної та незахищеної деревини;
- розподіл температур в перерізі елементів рами в режимі реальної пожежі;
- оцінка ефективності систем вогнезахисту.

Випробування конструкції дерев'яної рами проводились в рамках дослідження поведінки будівельних конструкцій в умовах реальної пожежі. Конструкція рами була виготовлена з клеєних дерев'яних брусів з частковим захистом її елементів вогнетривким гіпсокартоном.

Дерев'яна рама складалася з балки прольотом 2,6 м та двох стійок висотою 2,5 м і виготовлена з клеєного дерев'яного бруса перерізом 16×18 см. Матеріал бруса – клеєна деревина з соснових брусків поперечним перерізом 3×5см, щільністю 510 кг/м<sup>3</sup> та вологістю 15%. Фрагмент конструкції, підготовленої до випробувань, показано на рис.2.12.

Одна стійка і частина балки була захищена одним шаром вогнестійкого гіпсокартону товщиною 12 мм (зона А), інша частина мала вогнезахист із застосуванням двох шарів гіпсокартонних листів товщиною по 12 мм (зона В). Гіпсокартонні листи кріпилися до балки за допомогою самонарізів, а щілини між листами були зароблені гіпсовою штукатуркою (рис.2.13).

Середня частина балки була незахищена (Зона Б). Саме в цій частині проводились заміри температур в перерізі елемента. Температура в приміщенні та в перерізі елементів конструкції визначалася за допомогою термопар, встановлених згідно схеми зображеної на рис. 2.14. Реєстрація показів термопар здійснювалась приладами ПКРТ-0103.



Рис. 2.12. Конструкція рами підготовлена до випробувань в приміщенні з встановленим пожежним навантаженням

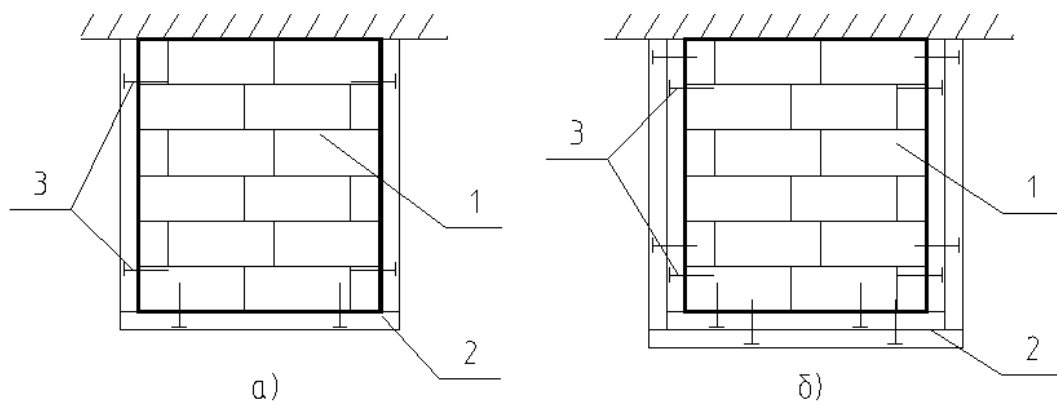


Рис. 2.13. Поперечний розріз дерев'яних елементів захищених гіпсокартонними листами: а) Зона А – один шар гіпсокартону; б) Зона В – два шари гіпсокартону 1 - клеєний дерев'яний брус; 2 – гіпсокартонні листи; 3 – самонарізи.

Пожежне навантаження було створено за допомогою штабелів розміром  $0,9 \times 0,9 \times 0,9$  м. складених з дерев'яних дошок. Дошки складались шарами,



перпендикулярними один до одного з розривами 5-10 см. Величина пожежного навантаження становила  $70\text{кг/м}^2$ . Через складність виконання зовнішнього навантаження та з умов безпеки експерименту дерев'яна рама не була завантажена.

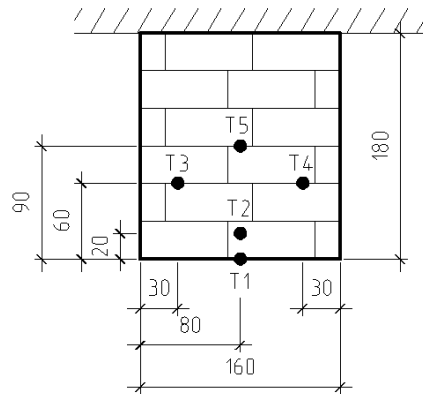


Рис. 2.14. Схема розташування термопар в перерізі незахищеного дерев'яного елемента

Після охолодження, зруйновані колони розпилювали в зоні горіння і в трьох точках замірювали глибину обвуглювання кожної з них. Межа розподілу між обвугленою та необвугленою деревиною мала порівняно різкий температурний градієнт, тому чітко було видно фронт обвуглювання деревини.

## 2.6. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

В ході проведення досліджень, представлених у розділі 2, зроблено наступні висновки:

1. Представлено методику випробування дослідних зразків з деревини на стиск, розтяг та згин з метою визначення їх фізико-механічних характеристик за нормальної температури ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );
2. Розроблено методику випробування несучої здатності центрально-стиснутих колон на спеціальному стенді за нормальної температури ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

3. Розроблено методику випробування несучої здатності центрально-стиснутих дерев'яних колон при їх локальному нагріванні без використання вогнезахисту та з використанням вогнезахисту;

4. Представлено методику виконання натурних вогневих випробувань дерев'яної рами та дослідження її поведінки в умовах пожежі із застосуванням різних систем вогнезахисту з використанням гіпсокартонних листів.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕРЕВИНИ

#### 3.1.1. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ І СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА СТИСК

Відповідно до програми досліджень (див. табл.2.1) було випробувано 8 зразків деревини призматичної форми розмірами 20x20x30 мм для визначення міцності деревини на стиск вздовж волокон.

Міцність деревини на стиск вздовж волокон визначалася за формулою:

$$f_{c,0,k} = \frac{F_{\max}}{A_0}, \quad (3.1)$$

де:  $f_{c,0,k}$  - міцність деревини на стиск вздовж волокон (характеристичне значення);  $A_0$  - початкова площа поперечного перерізу зразка;  $F_{\max}$  - значення руйнівного навантаження.

Характер руйнування зразків представлений на рис.3.1.

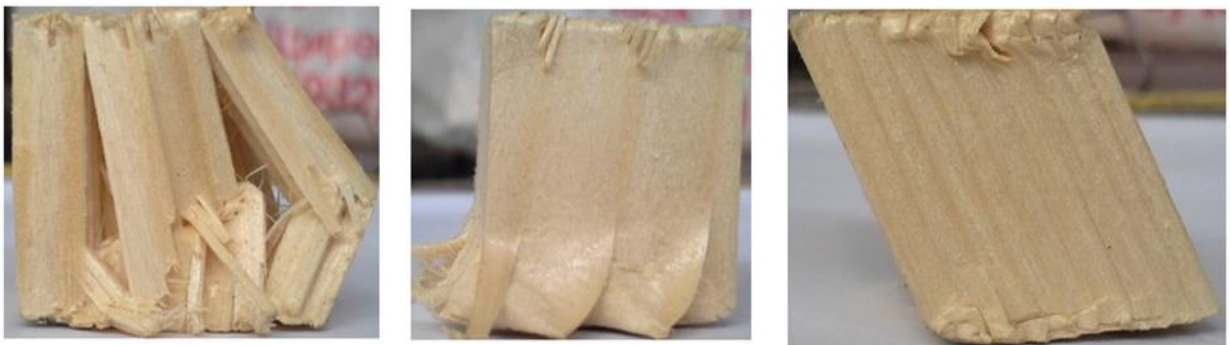


Рис.3.1. Характер руйнування дослідних зразків на стиск вздовж волокон.

Результати випробувань дерев'яних зразків на стиск подані в табл. 3.1.

За результатами першої серії випробувань зразків на стиск вздовж волокон, було встановлено середнє значення міцності деревини на стиск вздовж волокон яке склало 38,2 Н/мм<sup>2</sup> (МПа).

Таблиця 3.1

## Результати випробувань дерев'яних зразків на стиск

№ п.п.	Характеристика	Од. вим.	Номер зразка							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Ширина, $a$	мм	20.1	20	20.2	19.8	20	20.1	19.9	19.9
2	Глибина, $b$	мм	19.8	20	20.1	19.9	19.9	20	20	20
3	Довжина, $L$	мм	30	30.2	30.4	30.6	29.8	30.1	30.3	30.2
4	Площа перерізу, $A_0$	мм <sup>2</sup>	398	400	406	394	398	402	398	398
5	Руйнівне навантаження, $F_{max}$	кН	15.8	15.3	16.6	15.0	14.8	14.7	15.8	14.1
6	Міцність деревини на стиск вздовж волокон, $f_{c,0,k}$	Н/мм <sup>2</sup> (МПа)	39.7	38.3	40.8	38.1	37.2	36.6	39.6	35.3

### 3.1.2. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ II СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА РОЗТЯГ

Міцність деревини на розтяг вздовж волокон визначалася за формулою:

$$f_{t,0,k} = \frac{F_{max}}{A_0}, \quad (3.2)$$

де:  $f_{t,0,k}$  - міцність деревини на розтяг вздовж волокон;  $A_0$  - початкова площа поперечного перерізу зразка в місці розриву;  $F_{max}$  - значення руйнівного навантаження.

Характер руйнування зразків представлений на рис.3.2.

Результати випробувань подані в табл.3.2.

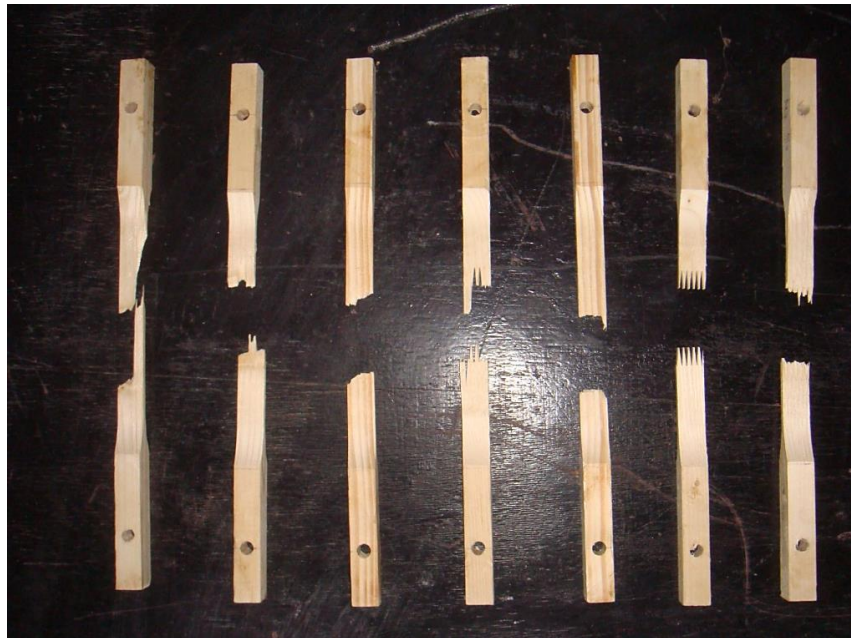


Рис. 3.2. Загальний вигляд зруйнованих зразків на розтяг.

Таблиця 3.2.

## Результати випробувань дерев'яних зразків на розтяг

№ п.п.	Характеристика	Од. вим.	Номер зразка							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Ширина, $a$	мм	20,1	20,0	19,9	20,0	20,2	20,1	20,0	19,9
2	Товщина тонкої частини, $b$	мм	4,0	3,9	4,0	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9
3	Площа перерізу, $A_0$	мм <sup>2</sup>	80,4	78	79,6	82,0	82,8	80,4	80,0	77,6
4	Руйнівне навантаження, $F_{max}$	кН	6,35	6,52	6,84	7,30	7,55	6,25	6,40	6,10
5	Міцність деревини на розтяг вздовж волокон, $f_{t,0,k}$	Н/мм <sup>2</sup> (МПа)	79,0	83,6	85,9	89,0	91,2	77,7	80,0	78,6
6	Модуль пружності деревини на розтяг вздовж волокон, $E_0$	Н/мм <sup>2</sup> (МПа)	13936	13881	14173	14219	13843	13510	13758	13656

За результатами випробувань II серії зразків на розтяг вздовж волокон, було встановлено наступне:

- середнє значення міцності деревини на розтяг вздовж волокон  $f_{t,0,k} = 79,3 \text{ Н/мм}^2 \text{ (МПа)}$ ;

- середнє значення модуля пружності деревини на розтяг вздовж волокон  $E_{0,mean} = 13\,800 \text{ Н/мм}^2 \text{ (МПа)}$ .

### 3.1.3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ ІІІ СЕРІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЗРАЗКІВ НА ЗГИН

Для визначення міцності деревини на згин було виготовлено 8 дослідних зразків (див. табл.2.1). Дослідні зразки являли собою бруски розмірами 20x20x300 мм.

Міцність деревини на згин визначалася за формулою:

$$\left. \begin{aligned} f_{m,k} &= \frac{F_{\max} \cdot L^2}{4 \cdot W_0}; \\ W_0 &= \frac{a^3}{6}. \end{aligned} \right\}, \quad (3.3)$$

де:  $f_{m,k}$ - характеристичне значення міцності деревини на згин;  $W_0$  - момент опору перерізу зразка;  $F_{\max}$ - значення руйнівного навантаження;  $a$  - сторона квадратного перетину балки (зразка);  $L$  - відстань між опорами.

Характер руйнування зразків зображений на рис.3.3.



Рис. 3.3. Загальний вигляд зруйнованих зразків на згин;

Результати випробувань подані в табл.3.3.

За результатами випробувань дослідних зразків ІІІ серії на згин було встановлено середнє значення міцності деревини на згин - 65 Н/мм<sup>2</sup>(МПа).

Таблиця 3.3

## Результати випробувань дерев'яних зразків на згин

№ п.п.	Характеристика	Од. вим.	Номер зразка							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	Ширина, $a$	мм	20.3	20	20	19.8	20.1	20.3	20.4	19.8
2	Глибина, $h$	мм	20	20	20.2	19.8	20	20	20.1	20.3
3	Відстань між опорами, $L$	мм	242	241	244	240	238	239	241	240
4	Початковий момент опору перерізу, $W_0$	мм <sup>3</sup>	1353	1333	1360	1294	1340	1353	1374	1360
5	Руйнівне навантаження, $F_{max}$	Н	1250	1690	1630	1280	1310	1680	1450	1350
6	Міцність деревини на згин, $f_{m,k}$	Н/мм <sup>2</sup> (МПа)	55.9	76.4	73.1	59.4	58.2	74.2	63.6	59.6

### 3.2. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН НА СТИСК ПРИ ДІЇ НОРМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Згідно із методикою, описаною в розділі 2, було випробувано колони із суцільно клеєної деревини. Необхідно було визначити несучу здатність колон на центральний стиск та проаналізувати напружено-деформований стан перерізу колони в місці її руйнування.

Вигляд зруйнованих зразків після випробування на стиск відповідно до їх марок, представлено на рис.3.4.



Рис. 3.4. Вигляд стиснутих дощатоклеєних колон після руйнування.

Результати випробувань дерев'яних колон на стиск подано в табл. 3.4.

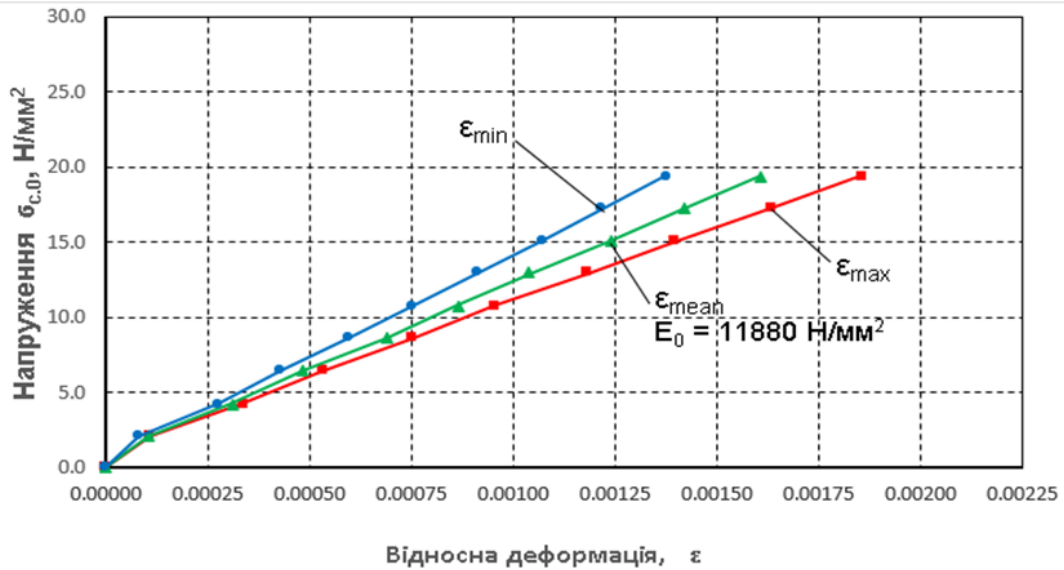
Таблиця 3.4.

№ п. п	Характеристика	Од. вим.	Марка зразка				
			К1.1	К1.2	К1.3	К1.4	К1.5
1	Довжина, $L$	мм	1002	1008	994	1003	1005
2	Ширина, $a$	мм	100	102	101	103	101
3	Товщина, $b$	мм	102	101	101	102	102
4	Початкова площа, $A_0$	мм <sup>2</sup>	10200	10302	10201	10506	10302
5	Руйнівне навантаження, $F_{crit}$	кН	340	318	285	320	340
6	Відносна деформація, $\varepsilon_1$		0.00031	0.00042	0.00028	0.00040	0.00025
7	Відносна деформація, $\varepsilon_2$		0.00124	0.00154	0.00132	0.00166	0.00123
8	Навантаження, $F_1$	кН	40	60	40	60	40
9	Навантаження, $F_2$	кН	140	200	180	220	160
10	Модуль пружності деревини на стиск вздовж волокон $E_0$	кН/мм <sup>2</sup> (Мпа)	11880	13450	14120	13570	13940
11	Критичний вигин, $u_{crit}$	мм	0.6	0.49	0.48	0.4	0.44

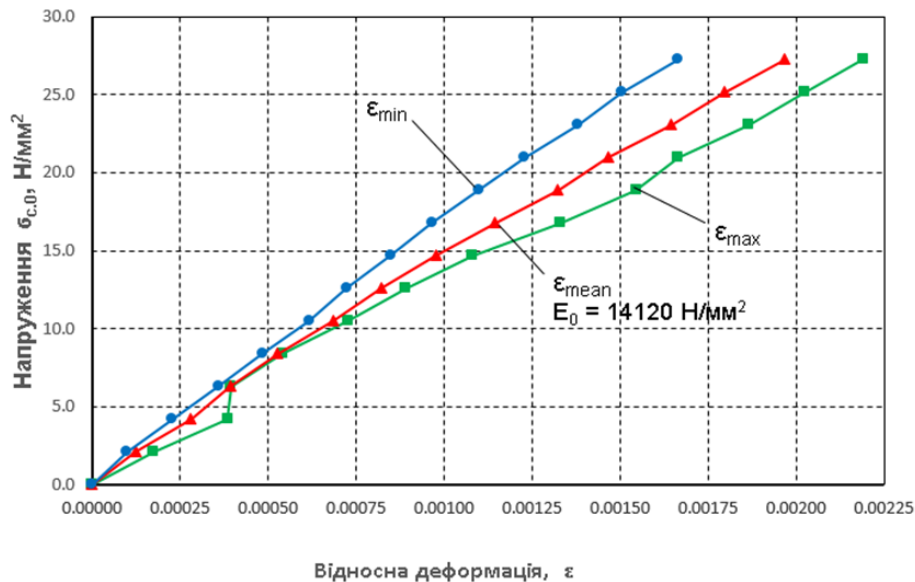
У ході випробувань було встановлено, що деформації колон протягом проведення замірів (до 60-85% від руйнівного навантаження), зростали прямо-пропорційно навантаженню. Попри це, напруження в перерізі наростали нерівномірно з різних сторін, що може свідчити про різні характеристики клеєних шарів деревини. На рис.3.5 зображено наростання відносних деформацій на двох протилежних сторонах колон К1.1 та К1.3. На основі характеру руйнування (див. рис. 3.4) і графіків зміни максимальних та мінімальних відносних деформацій в перерізах колон (рис 3.6), було визначено закономірності втрати стійкості колони.



Модуль пружності деревини для кожної колони був визначений за середніми відносними деформаціям на лінійних ділянках залежності напружень від відносних деформацій (рис. 3.5, табл. 3.4).



а)



б)

Рис. 3.5. Залежність відносних деформацій  $\epsilon$  деревини від напруження в перерізі колон: а) колона К1.1; б) колона К1.3.

Вигин колон був зафіксований з початку завантаження та наростає до їх руйнування. Як видно з графіків (рис. 3.6), наростання вигину мало лінійний характер і його різке збільшення відбувалося лише в момент руйнування колони. Лише в двох колонах (К-2, К-3) вигин дещо збільшив наростання при

220 та 240кН відповідно, але і надалі мав більш лінійний характер. Перед самим руйнуванням колон, при максимальному навантаженні, вигин знаходився в межах від 0,5 до 0,6мм.

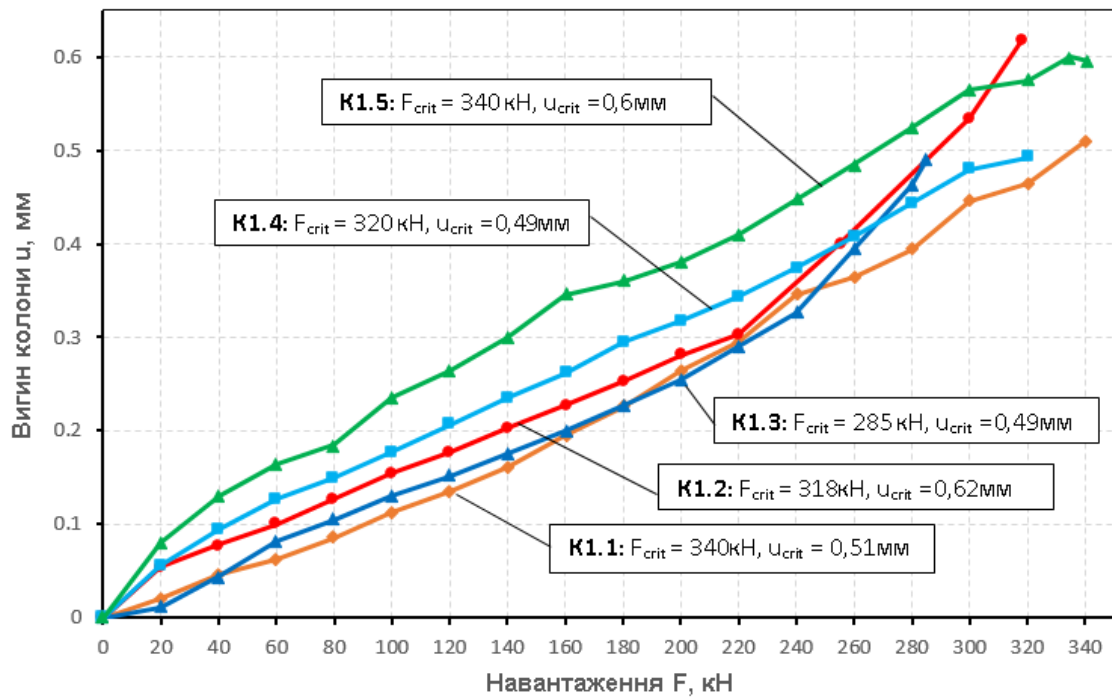
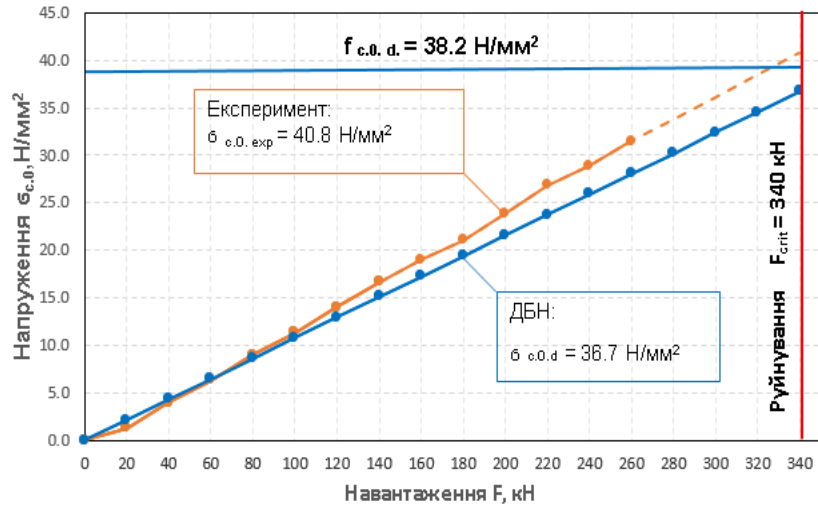


Рис. 3.6. Залежність вигину колон  $u$  від навантаження  $F$ .

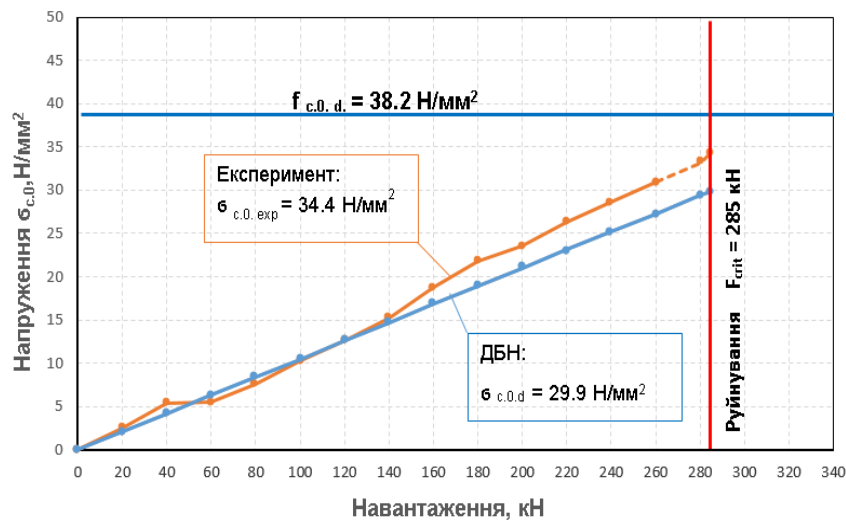
$F_{crit}$  – максимальне навантаження на колону;  $u_{crit}$  – критичний вигин перед руйнуванням зразка

За результатами експерименту та теоретичних розрахунків був проведений аналіз зміни напружень на найбільш стиснутій грані перерізу від навантаження та проведено порівняння з теоретичною кривою напружень в перерізі із врахуванням коефіцієнта поздовжнього згину  $K_{c,y}$ . Коефіцієнт поздовжнього згину визначався для кожної колони та знаходився в межах 0,90 – 0,94. Співвідношення розрахункової та геометричної довжин  $l_{ef}/l$  прийняте як для шарнірного обпирання кінців – 1,0. Графіки залежності напружень від навантажень при теоретичному розрахунку та за результатами експериментальних досліджень відображено на рис. 3.7. Для поданих графіків визначено максимальне теоретичне напруження згідно п.9.3 [11] в перерізі колони в момент її руйнування і прогнозоване напруження з однієї грані колони від експериментальних даних, та виконано порівняння з середнім

розрахунковим опором деревини за результатами випробувань на стиск (див. п. 3.1.1). На графіках представлені криві для колони К1.1 з найбільшим руйнівним навантаженням  $F_{crit} = 340$  кН, та колони К1.3 з найменшим руйнівним навантаженням  $F_{crit} = 285$  кН. Коефіцієнт використання визначався відношенням розрахункового напруження при руйнуванні  $\sigma_{c.0.d}$  до середнього розрахункового опору  $f_{c.0.d}$  та знаходився в межах 0,78 – 0,96 для різних колон.



а)



б)

Рис. 3.7. Залежність найбільших напружень  $\sigma_{c.0}$  в перерізі колон К1.1 та К1.3 від навантаження  $F$ : а) колона К-1.1; б) колона К1.3

$\sigma_{c.0.exp}$  – прогнозоване максимальне напруження в момент руйнування колони при  $F_{crit}$ ;  $\sigma_{c.0.d}$  – теоретичне максимальне напруження при  $F_{crit}$ ;

$f_{c.0.d}$  – середній розрахунковий опір деревини

### **3.3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН БЕЗ ЗАХИСТУ ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВАННІ.**

Дослідження міцності та деформативності дерев'яних колон без термозахисту на спільну дію навантаження та локального високотемпературного впливу передбачало два етапи з відповідними задачами:

1. Перший етап - поступове навантаження колони до рівня 90 кН (експлуатаційне значення) з вивченням напружено-деформованого стану конструкції, а саме: визначення вигину, поздовжніх деформацій контрольованого перерізу та розрахунок середнього модуля деформації деревини.

2. Другий етап - приєднання до навантаженого зразка попередньо нагрітої муфельної печі до температури 450-500 °С з наступною фіксацією показників вигину, поздовжніх деформацій контрольованого перерізу та температур всередині зразка через певні проміжки часу. При цьому навантаження на колону постійно підтримувалося на рівні 90 кН.

Температура в перерізі колони К2.1 змінювалась по мірі прогрівання та обуглювання деревини і поступового вигорання шарів колони (рис.3.8.).

Розміщення фронту обуглювання визначалося за температурою межі поділу – 300°С [9]. Початок обуглювання деревини зафіксовано на 13 хв експерименту, що відповідало досягненню температури 300°С на поверхні деревини (термопара Т2). До цього моменту відбувалася термічна деструкція деревини та початок її горіння. Температура 300°С була також досягнута до завершення експерименту на термопарах Т3, Т4, та Т5, що свідчило про вигорання деревини на глибину до 20 мм. На термопарі Т6 температура піднялася дещо вище 100°С, тобто до руйнування колони деревина навколо термопари не була повністю зруйнована.

Розрізання зразка колони після експерименту (рис 3.12) показало, що середня глибина обвуглювання становила 20,7 мм, що відповідало теорії про температуру повного вигорання деревини при температурі 300°C.

З графіків зміни температури на термопарах Т3, Т4, Т5 (розміщені всередині деревини) відзначено чітку зону затримки зростання температури в деревині в зоні наближеній до 100°C, зумовлене процесом перетворення вологи, яка є в деревині, в пару. На 38 хв експерименту відбулося руйнування колони, що чітко відображено на суміщеному графіку наростання вигину та температури в перерізі від часу. Вигин колони плавно почав наростати від початку дії високої температури і на 24 хв вигин почав наростати набагато швидше аж до руйнування колони на 38 хв.

Максимальний зафіксований вигин колони перед руйнуванням склав 9мм. Необхідно відмітити, що в деяких колонах (К-2.1, К2.3 та К2.4) на початку дії високої температури відзначено зворотній вигин в сторону печі, що може свідчити про температурне розширення зовнішніх волокон деревини від температури ще до моменту їх деструкції (рис. 3.13). В інших колонах цього явища не відбувалося з двох причин: наявність вигину в сторону від печі ще до моменту дії температури і, можливо, швидша термічна деструкція поверхні колони.

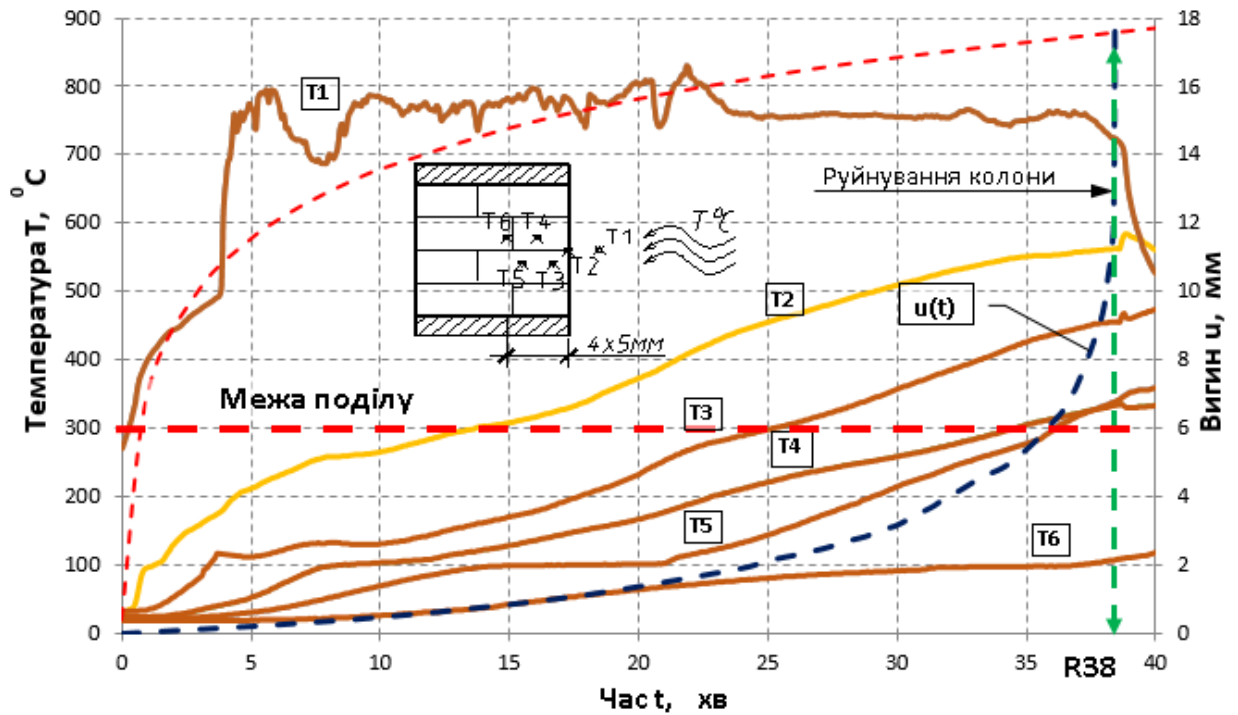


Рис. 3.8. Покази термопар  $T_i$  в перерізі дощатоклеєної колони К2.1 і графік кривої деформацій вигину  $u(t)$ :

1... 6 – графіки  $T(t)$  термопар згідно схеми.

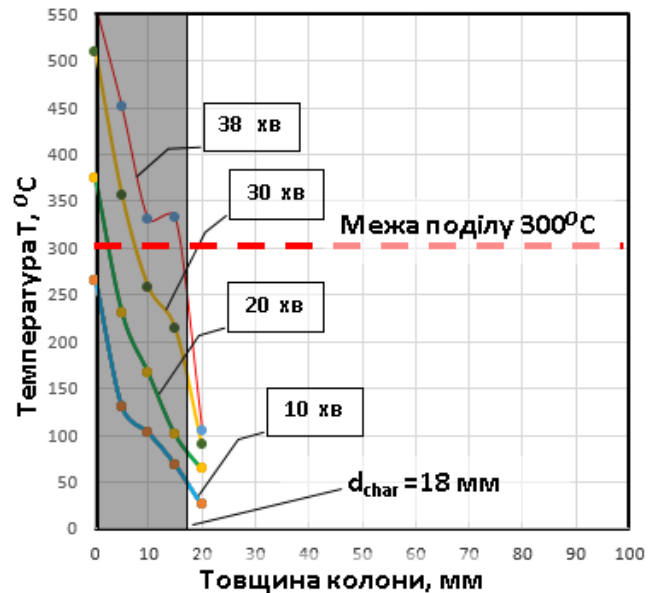


Рис. 3.9. Розподіл температур в перерізі колони К2.1 на різних етапах експерименту

Відносні деформації визначалися посередині висоти колони за результатами вимірювання 6-ти мікроіндикаторів, які були встановлені з трьох ненагріваних сторін колони. Відносна деформація сторони, протилежної до

нагріваної, визначалася, як середнє значення між показниками двох мікроіндикаторів, встановлених на цій грані. По стороні, яка нагрівалася, відносні деформації визначені шляхом апроксимації показів найближчих приладів по бокових поверхнях (рис. 3.9). Наприклад, в момент часу  $t = 10\text{хв}$ , значення відносної деформації  $\Delta_{10}$  визначалось за формулою  $\Delta_{10} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$ , а в момент часу  $t = 20\text{хв}$ , значення відносної деформації  $\Delta_{20}$  визначалось за формулою  $\Delta_{20} = \frac{\Delta_3 + \Delta_4}{2}$ .

Відносні деформації колони К2.1 (рис.3.10.), протягом випробування на спільну дію навантаження та локального нагріву змінювались з моменту

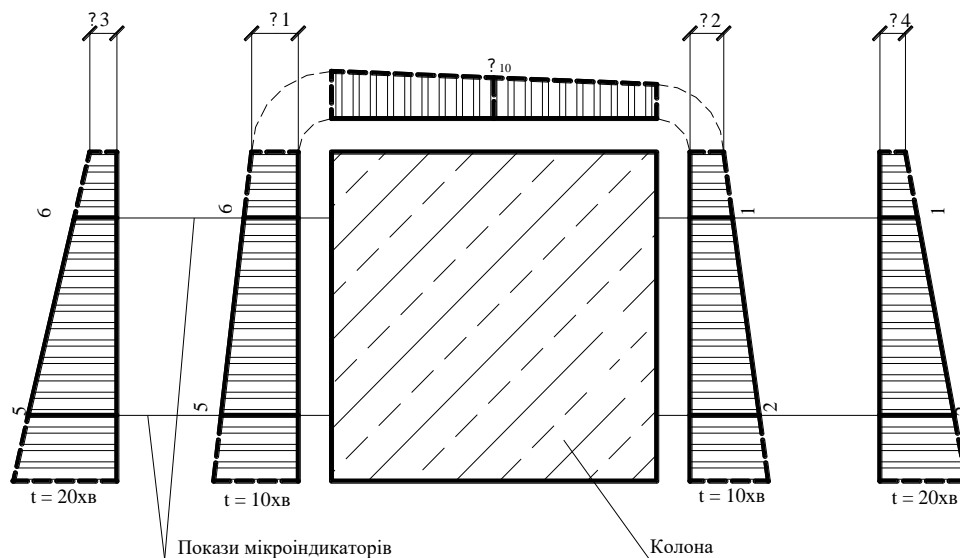


Рис. 3.10 Схема визначення відносних деформацій

на експонованій поверхні шляхом апроксимації найближчих показників.

нагріву поверхні колони, спочатку лінійно до 10 хвилини і пізніше, а потім не лінійно до моменту зняття приладів. На 11 хвилині на поверхні протилежній до нагріваної (експонованої) поверхні появився розтяг. Мікроіндикатори були зняті з колони на 26 хвилині, а колона повністю зруйнувалася на 38 хвилині (див.рис. 3.8). Після 26 хвилини вигин колони наростав ще стрімкіше.

Залежність відносних деформацій деревини  $\epsilon$  під час нагріву на поверхнях перпендикулярним нагріву представлена на рис.3.11.

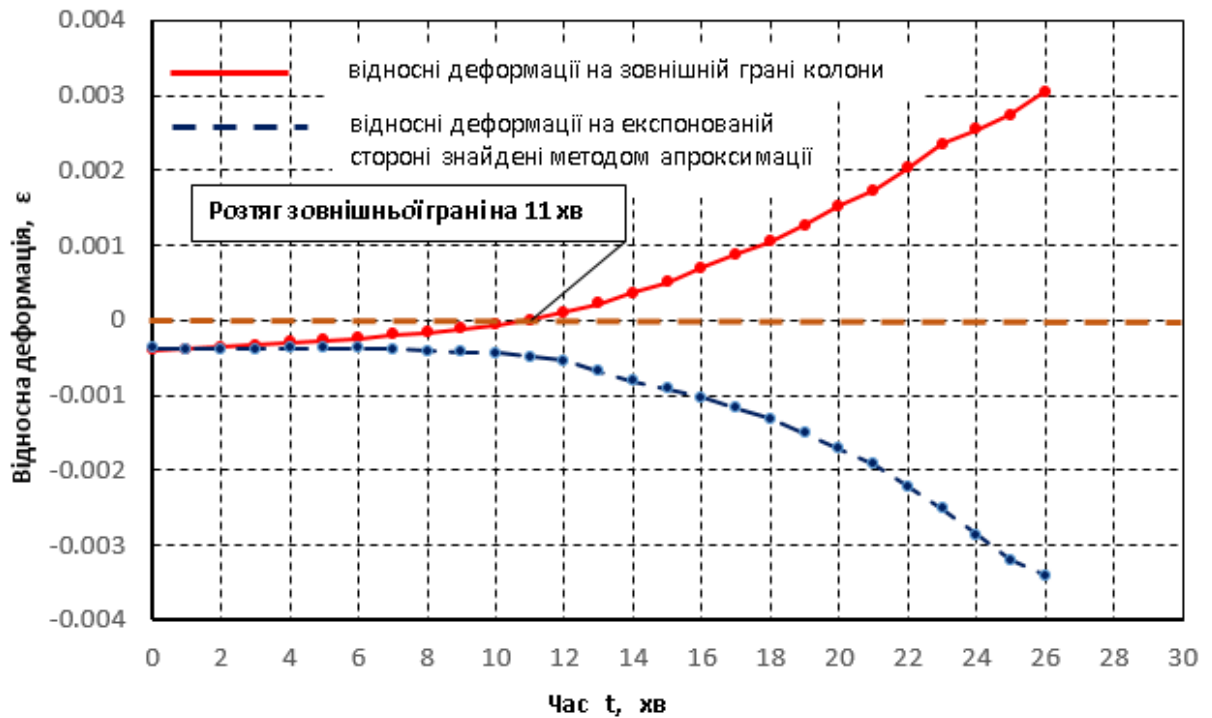


Рис. 3.11. Залежність відносних деформацій деревини  $\epsilon$  від часу нагріву на експонованій та протилежній до неї сторонах для колони К2.1  
Загальний вигляд колон після руйнування показаний на рис. 3.12.

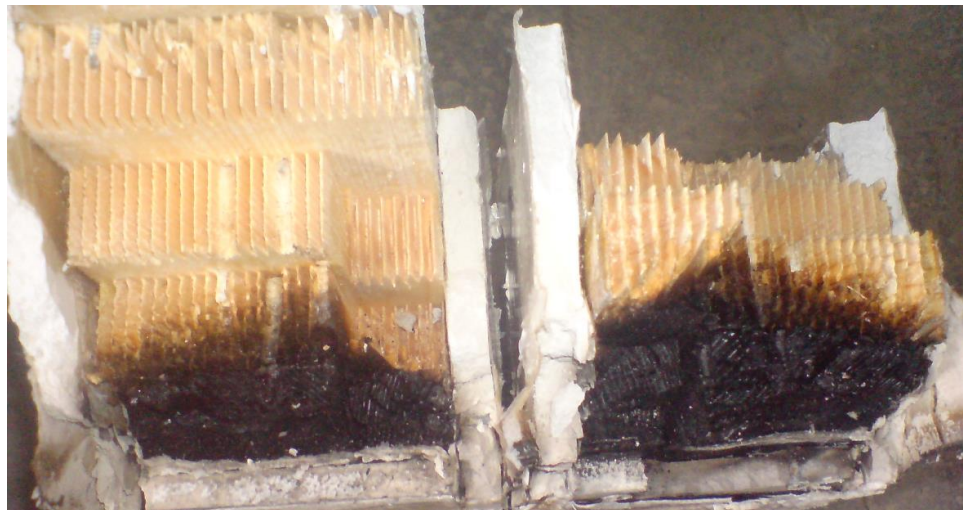


Рис. 3.12. Вигляд дощатоклеєних колон після руйнування на сумісну дію осьового навантаження та локального нагріву

Після випробувань визначалася фактична глибина обвуглювання колон при їх локальному нагріванні. Для цього, після охолодження зруйновані



колони розпилювали в зоні горіння і в трьох точках замірювали глибину обуглювання кожної колони.

Результати замірів, а також швидкості обуглювання деревини колон наведені в табл. 3.5.

Зведені дані щодо глибини та швидкостей обуглювання колон К2.1-2.4

Таблиця 3.5.

Марка зразка	Тривалість експерименту з дією	Тривалість обуглювання, хв	Глибина обуглювання, мм			Середня глибина обуглювання, мм	Швидкість обуглювання, мм/хв	
			т.1	т.2	т.3		колони	середня
К2.1	38	25	19	22	21	20.7	0.83	0.73
К2.2	44	30	18	17	21	19	0.63	
К2.3	41	28	19	21	20	20	0.71	
К2.4	39	26	18	21	20	19.6	0.76	

Середнє значення швидкості обуглювання деревини з незахищеною поверхнею становило 0,73 мм/хв. Отримане значення швидкості обуглювання незахищеної деревини є близьким до значень 0,6 – 1,0 мм/хв, регламентованих [17,43,101]. Ці дані були використані для теоретичних розрахунків вогнестійкості колон згідно діючих норм [8].

#### **3.4. Результати ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ІЗ ЗАХИСТОМ ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВІ.**

Аналогічно до колон V серії, колони VI серії були випробувані на спільну дію навантаження та локального впливу високої температури, з тією різницею, що експонована поверхня була захищена одним шаром гіпсокартонного листа.

Температура в перерізі колони КЗ.1 змінювалась по мірі прогрівання та обвуглювання деревини і поступового вигорання шарів елемента (рис.3.13). Розміщення фронту обвуглювання було визначено за температурою межі поділу  $300^{\circ}\text{C}$  [9]. Термопара Т1 фіксувала температуру в печі, термопара Т0 - на поверхні гіпсокартону, а термопара Т2 - на поверхні деревини під гіпсокартоном. З графіків зміни температури на термодатчиках Т3, Т4, Т5, Т6, встановлено чітку зону затримки зростання температури в деревині при значенні  $100^{\circ}\text{C}$ , зумовлену процесом перетворення вологи, яка є в деревині, в пару. На 69-ій хвилині експерименту відбулося руйнування колони.

За результатами вимірювання температури всередині перерізу колон були побудовані діаграми розподілу температури в перерізі в різні проміжки часу (рис.3.14). На поданих діаграмах відзначено різну швидкість прогрівання гіпсокартону та деревини, а також можна відмітити момент повної деструкції деревини при температурі  $300^{\circ}\text{C}$  (Межа поділу). Початок обвуглювання деревини (на поверхні зразка  $300^{\circ}\text{C}$ ) був відмічений на 54-ій хвилині і на момент руйнування колони (69 хв) середня глибина обвуглювання складала 8мм (за результатами замірів після руйнування), тобто швидкість обвуглювання – 0.53 мм/хв.

Попри те, що колона з гіпсокартонними захистом була зруйнована набагато пізніше від колони без захисту, вона мала набагато менший вигорілий шар (середній 8мм), що пояснюється поступовим нагріванням деревини протягом довшого періоду часу на більшу глибину, коли ще діє вогнезахист і відповідно зменшення міцнісних та деформативних властивостей нагрітої деревини.

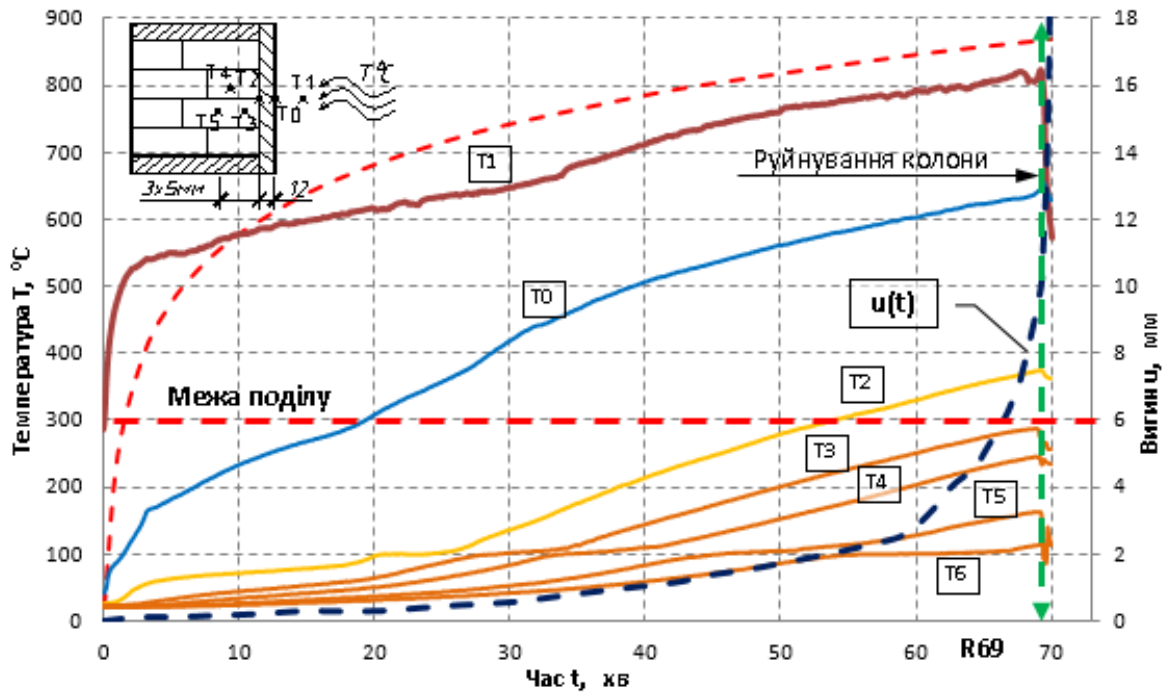


Рис. 3.13. Покази термодар  $T_i$  в перерізі дощатоклеєної колони КЗ.1 і графік деформацій вигину колони  $u(t)$ .  $T_0 \dots T_6$  – графіки зміни  $T(t)$  на термодарах в часі.

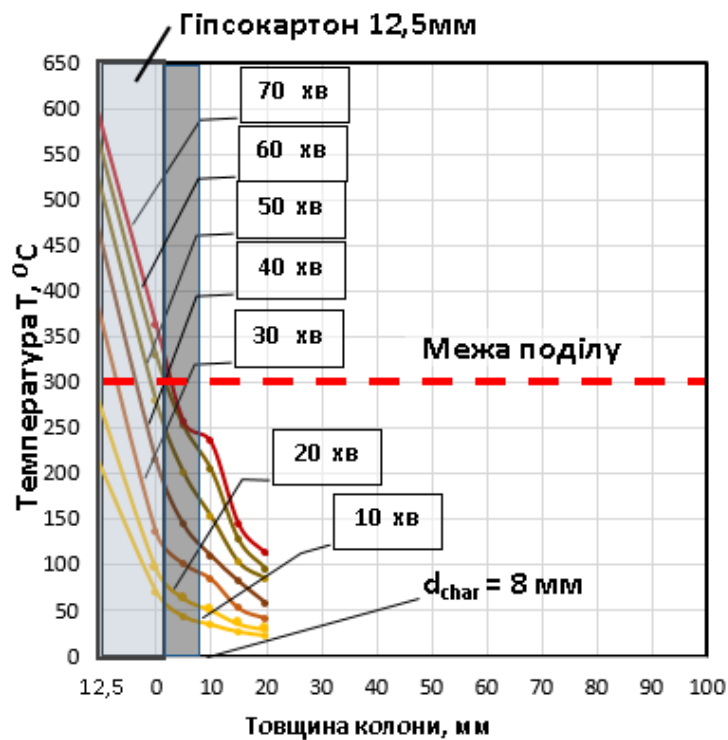


Рис. 3.14. Розподіл температур в перерізі колони КЗ.1 на різних етапах експерименту

Відносні деформації визначалися посередині висоти колони за результатами вимірювання 6 мікроіндикаторів, аналогічно до колон V-ої серії. Відносні деформації колони К3.1 (рис.3.15), протягом випробування на спільну дію навантаження та локального нагріву змінювались з 9-ої хвилини нагріву колони, спочатку лінійно до 35-ої хвилини, а потім не лінійно до моменту зняття приладів. На 43-ій хвилині на поверхні, протилежній до експонованої, появився розтяг. Мікроіндикатори були зняті з колони на 60-ій хвилині, а колона повністю зруйнувалася на 69-ій хвилині (рис. 3.13).

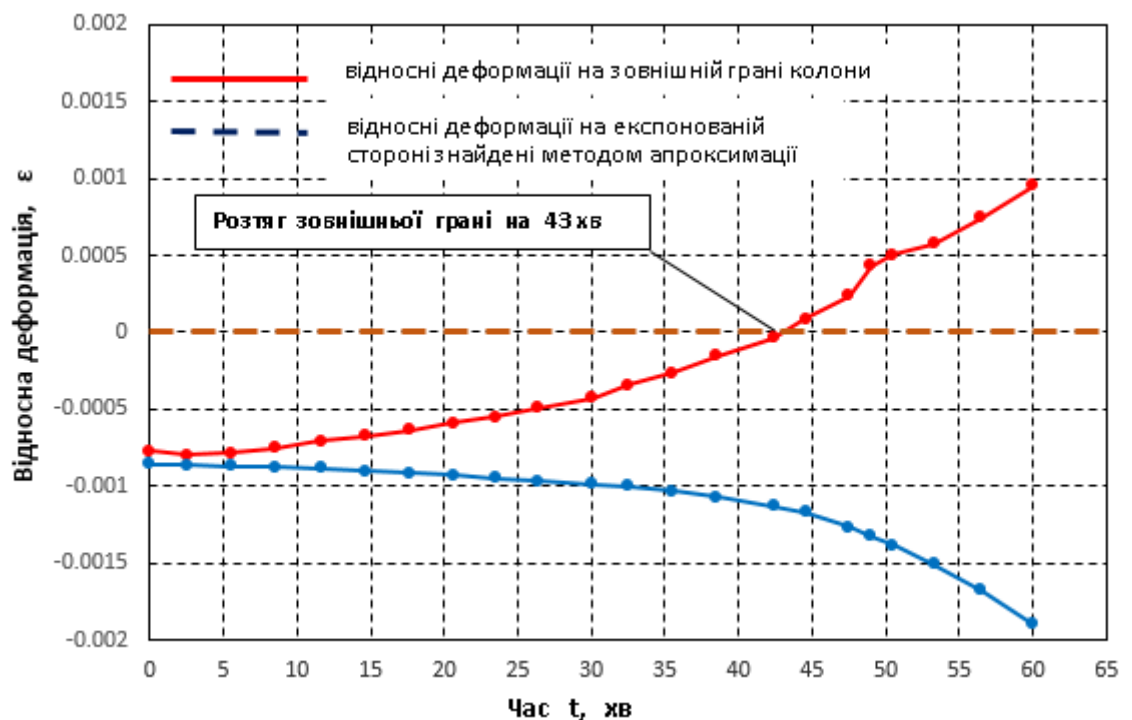


Рис. 3.15. Залежність відносних деформацій деревини  $\epsilon$  від часу нагріву на експонованій та протилежній до неї сторонах для колони К3.1

Застосування вогнезахисту з вогнетривких гіпсокартонних листів товщиною 12мм приблизно на 45% затримує процес обуглювання деревини і відповідно підвищує межу вогнестійкості у порівнянні з незахищеною деревиною майже в 2 рази.

Після охолодження, зруйновані колони розпилювали в зоні горіння і в трьох точках замірювали глибину обуглювання кожної з них. Межа розподілу між обугленою та необугленою деревиною мала порівняно різкий

температурний градієнт, тому чітко було видно фронт обуглювання деревини.

Результати замірів, а також визначені швидкості обуглювання деревини колон приведені в табл. 3.6.

Зведені дані глибин та швидкостей обуглювання зразків-колон  
Таблиця 3.6.

Марка зразка	Тривалість експерименту з дією температури, хв	Тривалість обуглювання, хв	Глибина обуглювання, мм			Середня глибина обуглювання, мм	Швидкість обуглювання, мм/хв	
			т.1	т.2	т.3		колони	середня
К3.1	69	15	9	7	8	8.0	0.53	0.53
К3.2	78	22	12	10	13	12.0	0.55	
К3.3	74	21	11	9	12	10.7	0.51	
К3.4	71	19	9	10	11	10.0	0.53	

### 3.5. РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНОГО ВИПРОБУВАННЯ В УМОВАХ РЕАЛЬНОЇ ПОЖЕЖІ

В ході експерименту VII серії, фіксували час горіння незахищеної деревини та деревини, покритої гіпсокартонними листами. Також проводились заміри температур в перерізі елемента. Результати випробувань дослідного зразка РМ-1 представлені у вигляді графіків зміни температури в часі (рис.3.16).

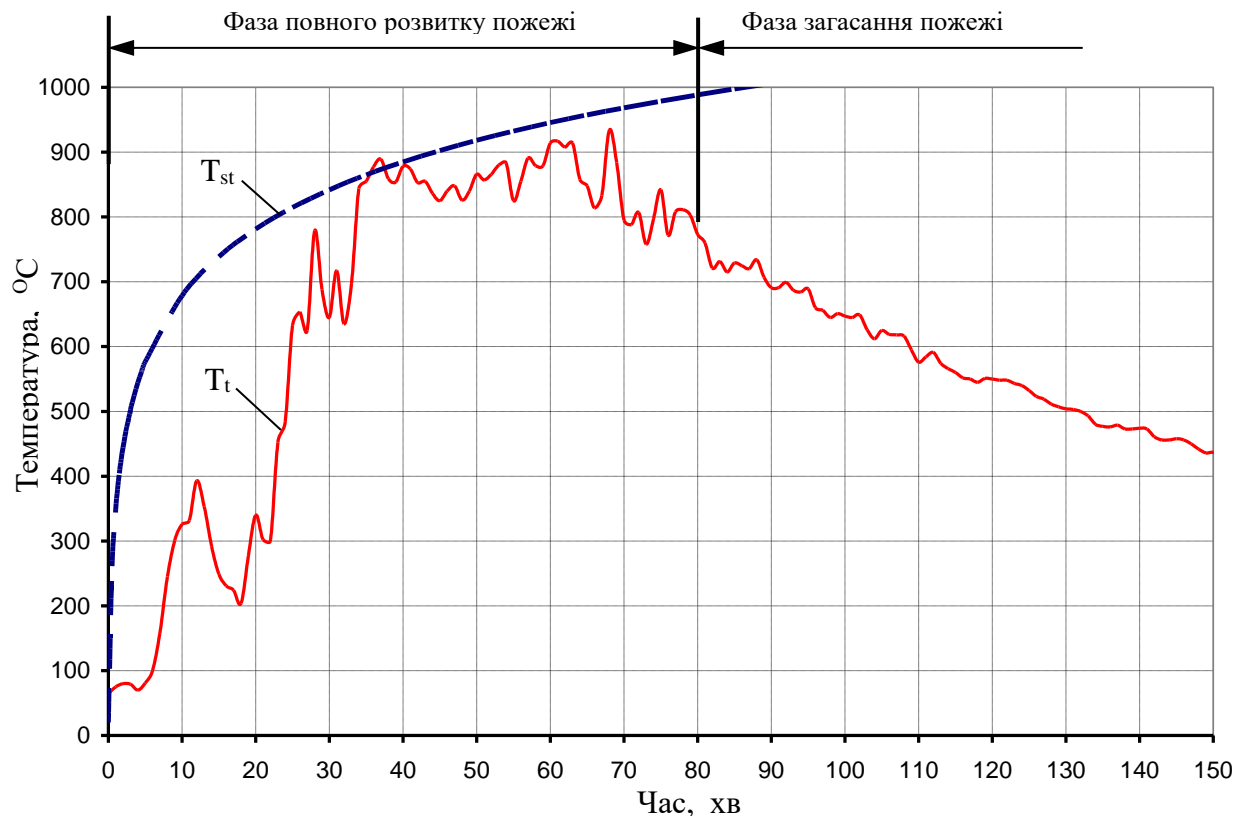


Рис. 3.16. Зміна температури  $T_t$  в приміщенні під час пожежі.

$T_{st}$  – стандартна температурна крива

На рис.3.16 зображено розвиток температур в приміщенні внаслідок вигорання пожежного навантаження. В перші хвилини після підпалу штабелів з дошок температура в приміщенні зростала достатньо швидко і через 30 хв. становила близько  $800^{\circ}\text{C}$ . Протягом наступних 50-ти хвилин спостерігався піковий етап розвитку пожежі з температурою близькою до  $900^{\circ}\text{C}$ . Після 80-ої хвилини пожежі відбувалося поступове її загасання з повільним зменшенням температури в приміщенні. При порівнянні графіків зміни температури в умовах реальної пожежі зі стандартною температурною кривою, було відмічено схожість характеру наростання температури в фазі повного розвитку пожежі, починаючи з 20-ої хвилини експерименту, тобто з моменту розгорання.

Температура в перерізі балки в зоні Б змінювалась по мірі обвуглювання деревини і поступового вигорання шарів елемента (рис.3.17). Розміщення фронту обвуглювання можна визначити за температурою межі поділу –  $300^{\circ}\text{C}$

[9]. Оцінивши зміну температури на різній глибині поперечного перерізу балки було визначено середнє значення швидкості обуглювання деревини балки, яке становило 0,38 мм/хв. З графіків зміни температури на термопарах T1, T2, T3, T5 встановлено чітку зону затримки зростання температури в деревині при значенні 100 °С, зумовлене процесом перетворення вологи, яка є в деревині, в пару. Термопара T4 показувала нестабільні значення температури в процесі експерименту і тому для аналізу не враховується. На 114-ій хвилині експерименту відбулося різке зростання температури на термопарі T5, внаслідок відпадання обугленого шару деревини в зоні розташування термопари.

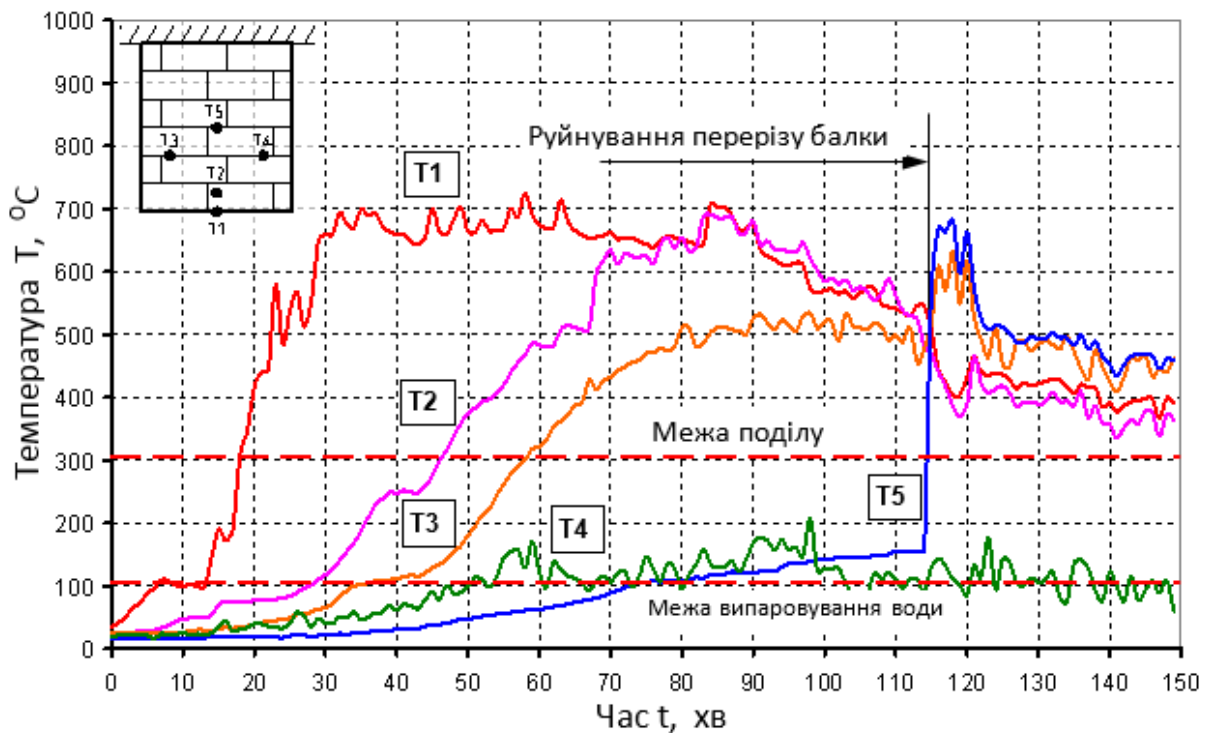


Рис. 3.17. Покази термопар в перерізі незахищеного елемента дерев'яної рами

На рис. 3.18 приведена фотофіксація пожежі з етапами руйнування конструкції рами та її вогнезахисту, починаючи з 25-ої хвилини експерименту.



а) Початок обвуглювання та горіння деревини балки в зоні Б



б) Обвуглювання балки на глибину 25 - 30мм в зоні Б, розриви в стиках гіпсокартонних листів



в) Обвуглювання балки на глибину 60 – 70 мм в зоні Б, відпадання двох шарів гіпсокартону від конструкції



г) Обвуглювання балки на глибину більше 100 мм в зоні Б,

Рис. 3.18. Випробування рами, захищеної вогнестійким гіпсокартоном, в умовах реальної пожежі

Згідно проведених спостережень за поведінкою зразка в процесі експерименту були встановлені наступні етапи руйнування конструкції рами та її вогнезахисту:

- 20 – 30 хв. – початок горіння деревини балки по середині прольоту (зона Б), температура в приміщенні стрімко зростала від 300 до 700 °С;
- 30 – 70 хв. – період інтенсивного обвуглювання деревини в зоні Б при максимальній температурі в приміщенні 850 - 900 °С. Вогнезахист з



гіпсокартонних листів практично не зруйнувався, за виключенням відшарування частини подвійного гіпсокартонного покриття на нижній стороні балки (зона А), і утворення розривів на стиках листів;

- 70 – 100 хв. – повне руйнування вогнезахисту з подвійного гіпсокартону (зона А) внаслідок висмикування самонарізів від надмірної ваги гіпсокартону з частково обвугленого верхнього шару деревини. Часткове руйнування вогнезахисту з одним шаром гіпсокартонних листів (зона В). Інтенсивне обвуглювання деревини в зоні А та Б.

- 100 – 140 хв. - руйнування системи вогнезахисту в зоні В. Обвуглювання балки на глибину більше 100 мм в зоні Б, з наступним повним руйнуванням конструкції рами.

Як видно на рис. 3.18,г після повного руйнування вогнезахисних систем інтенсивність обвуглювання деревини балки в зоні Б суттєво відрізнялася від обвуглювання в зонах А та В, що було пов'язано з затримкою процесу горіння деревини внаслідок використання вогнезахисту з гіпсокартонних листів.

Проводячи узагальнення вищенаведених експериментальних досліджень під час реальної пожежі, можна встановити наступне:

- фактична швидкість обвуглювання в умовах реальної пожежі для клеєної деревини становила 0,38 мм/хв, що є нижче нормативних значень, наведених в [12], які знаходяться в межах 0,5 -0,7 мм/хв;

- під час вогневого впливу розшарування по клеєних швах не спостерігалось, елементи клеєної рами обвуглювались рівномірно по всьому перерізу, як по деревині, так і по матеріалу швів;

- застосування вогнезахисту з вогнестійких гіпсокартонних листів приблизно на 35% затримує процес обвуглювання деревини і відповідно підвищує межу вогнестійкості у порівнянні з незахищеною деревиною;

- вогнезахист конструкції з вогнестійких гіпсокартонних листів зберігався до 70 хв пожежі;

- ; температура в перерізі незахищеної деревини на відстані 10 мм від нижньої грані становила 300°C на 46 хв від початку пожежі, у порівнянні до незахищених металевих конструкцій, які б за цей же час прогрілися по всьому перерізу до температури 700-800°C, за умови, що для металевих конструкцій критична температура становить 500°C.

### 3.6. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.

Викладені в цьому розділі матеріали досліджень дозволили зробити наступні висновки:

1. Клеєні дерев'яні конструкції можуть ефективно використовуватись в будівлях та спорудах і при дотриманні вимог з проектування на вплив пожежі забезпечувати відповідний рівень пожежної безпеки об'єктів, не нижчий за аналогічні рішення з використанням металевих або залізобетонних конструкцій.

2. Для вивчення напружено-деформованого стану на експонованій (нагріваній) поверхні дерев'яних конструкцій можна використовувати метод апроксимації показників з приладів встановлених на суміжних бокових поверхнях, які не піддаються дії високої температури.

3. Метод випробування на локальну дію високих температур можна застосовувати для визначення вогнестійкості елементів конструкцій при умові забезпечення режиму зовнішньої температури наближеної до стандартної пожежної кривої.

4. Для вогнезахисту деревини доцільніше використовувати один шар вогнестійкого гіпсокартону, оскільки більша кількість шарів робить вогнезахист важким і він швидше відпадає при пожежі від конструкції через прогорання деревини в місцях металевих самонарізів які кріплять ці листи або використовувати надійніше кріплення гіпсокартонних листів до дерев'яних елементів.

## РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗВ'ЯЗКИ ЗАДАЧ НЕРІВНОМІРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ

### 4.1. ВПЛИВ ЛОКАЛЬНОГО НАГРІВУ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН

Розрахунок дерев'яних колон на дію зовнішнього навантаження та локальний вплив високих температур складається з розв'язку двох задач: температурної та силової. Для вирішення температурної задачі необхідні наступні вихідні дані:

1. Геометричні розміри колони (рис. 4.1).
2. Теплофізичні характеристики деревини, а саме:
  - коефіцієнт теплопередачі  $\lambda$ ;
  - питома теплоємність  $c_p$ ;
  - щільність матеріалу  $\rho$ .

В цілому ці параметри залежать від температури деревини, проте в першому наближенні їх можна інтерпретувати як константи.

3. Граничні умови для температурного поля - на одній з шести сторін призми (тобто колони) задається нагрівання  $T_v(y, z, t)$ , а температура на інших сторонах дорівнює температурі навколишнього середовища (див. рис. 4.1) яка також може змінюватися в часі.

4. Відома початкова температура колони  $T_0(x, y, z)$ .
5. Механізм передачі тепла - кондуктивна теплопередача [102,103].
6. Потрібно визначити температуру всередині дерев'яної колони в точці М з координатами  $(x, y, z)$  в момент часу  $t = 0$ .

Для визначення температурного поля виконується розрахунок системи диференціальних рівнянь, рішенням яких є система рівнянь у вигляді:

$$\begin{aligned}
& T(x, y, z, t) = T_1(x, y, z, t) + T_2(x, y, z, t); \\
& T_1 = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}^{**}(t) \cdot \left[ \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \right]; \\
& A_{ijk}^{**}(t) = \frac{64}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k} \cdot \left[ T_0 \cdot e^{-k_1 \cdot t} + T_w \cdot (1 - e^{-k_1 \cdot t}) \right]; \\
& T_2 = \left(1 - \frac{z}{b}\right) \cdot \sum_{j=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{k=1,2,3,\dots}^{\infty} A_{jk}^* \cdot \left[ \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \right] + \\
& + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}(t) \cdot \left[ \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \right]; \\
& A_{jk}^* = -\frac{8}{\pi^2 i \cdot k} \cdot \left\{ \begin{aligned} & (T_{v1} + T_w) \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_1}{L}\right) \right] + \\ & + (T_{v2} + T_w) \cdot \left[ \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_1}{L}\right) - \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_2}{L}\right) \right] + \\ & + (T_{v2} + T_w) \cdot \left[ \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_2}{L}\right) - \cos(k \cdot \pi) \right] \end{aligned} \right\}; \\
& A_{ijk} = -\frac{2 \cdot k_3}{i \cdot \pi \cdot k_1} \cdot (1 - e^{-k_1 \cdot t}) \cdot A_{jk}^*; \\
& k_1 = a_{red} \cdot \left[ \left(\frac{i \cdot \pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{L}\right)^2 \right]; \quad k_2 = \frac{8}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k}; \\
& k_3 = a_{red} \cdot \left[ \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{L}\right)^2 \right]; \quad C_{ijk} = \frac{64 \cdot (T_0 - T_w)}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k}; \\
& i = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad j = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad k = 1, 3, 5, \dots, \infty.
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Розв'язок диференціального рівняння температурного поля наведено в додатку А.

З використанням (А.24) для параметрів умовної колони з показниками:  $b = h = 0,2$  м;  $L = 3,0$  м;  $z_1 = 1,0$  м;  $z_2 = 2,0$  м;  $y = \frac{b}{2}$ ;  $T_0 = 20$  °С;  $T_w = 20$  °С;  $T_{v1} = 100$  °С і  $T_{v2} = 200$  °С для значень чисел Фур'є

$$Fo = \frac{a}{b^2} \cdot t$$

були побудовані ізополя температурних полів в тілі колони (рис. 4.1 та 4.2).

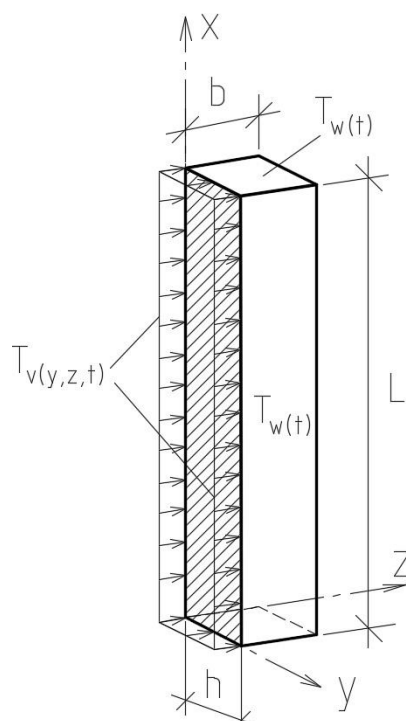


Рис. 4.1. Схема для визначення температурного поля всередині дерев'яної  
КОЛОНИ

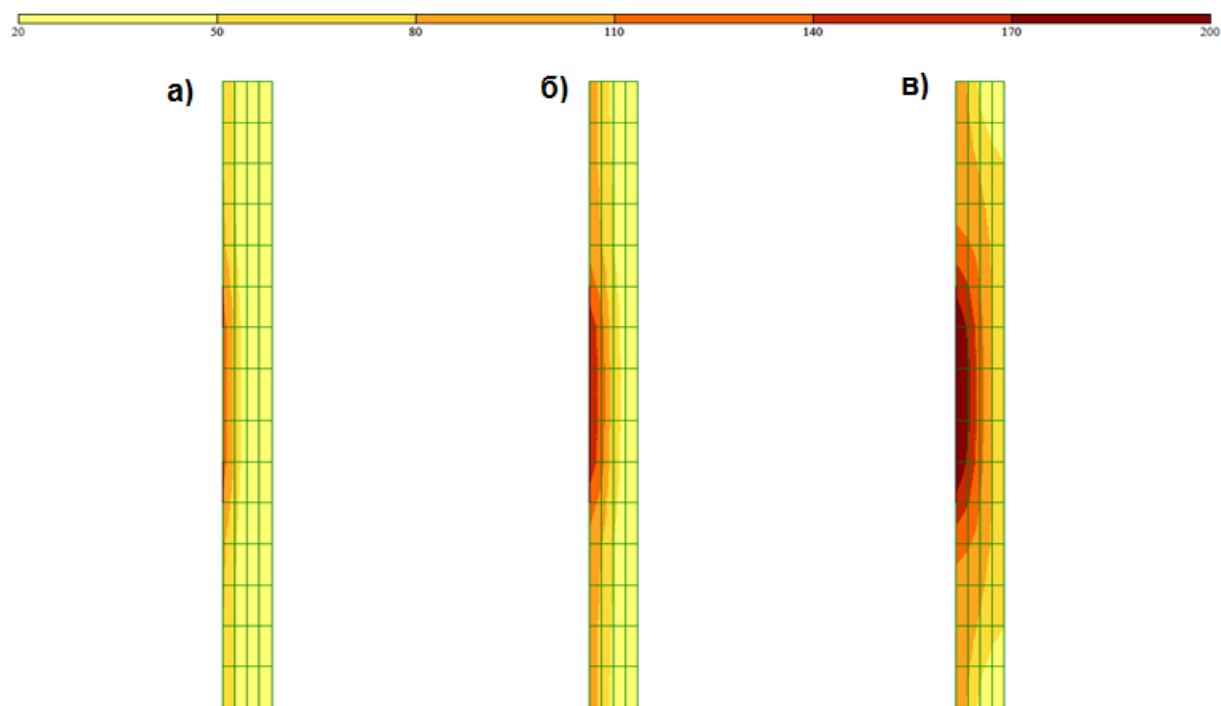


Рис. 4.2. Температурні ізополя в тілі дерев'яної колони.

а) при  $Fo=0,001$ ; б) при  $Fo=0,01$ ; в) при  $Fo=0,1$ .

Викладені в цьому підрозділі матеріали досліджень дозволили зробити наступні висновки:

1. Отримано аналітичний розв'язок задачі з розподілу температури в дерев'яній колоні, частина якої знаходиться в змінному (в часі) температурному полі. Передбачалося, що температура на п'яти гранях колони однакова і складала  $T_w(t)$  (площини (0ZY), (LZY), (0XZ), (hXZ) і (bYX)). Крім того, температура на локальній ділянці площини (0YX) складала  $T_v(y, x, t)$  і могла змінюватися за координатами і в часі (див.рис. 4.1).

2. Вирішення даної задачі допускало узагальнення на будь-яку дерев'яну колону прямокутного перерізу (необхідно тільки було використовувати відповідні теплофізичні константи).

3. Допускалося використання розв'язку (4.1) у випадку нагрівання колони температурою  $T_v$  з боку площин (0ZY), (LZY), (0XZ), (hXZ) і (bYX). В цьому випадку результат досягався циклічною перестановкою змінних  $x, y, z$  і параметрів «0», «b» і «L».

## **4.2. ВПЛИВ НАГРІВАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕРЕВИНИ КОЛОН**

Під час високотемпературного нагріву при пожежі змінюються фізико-механічні властивості деревини, у зв'язку з випаровуванням води до  $100^{\circ}\text{C}$  з деревини та термодеструкції деревини при вищих температурах (до  $300^{\circ}\text{C}$ ).

Сучасні будівельні норми для розрахунку несучої здатності і деформацій дерев'яних будівельних конструкцій, які нагріваються, вимагають враховувати реальні залежності міцності та деформативності деревини від температури [8].

Вплив температури на величини міцності та деформативності деревини враховують шляхом введення деяких емпіричних коефіцієнтів, які не дозволяють в повній мірі враховувати зміну цих властивостей в об'ємі колони.

У цьому підрозділі представлені результати теоретичних досліджень, спрямованих на виявлення закономірностей зміни міцності і деформативності деревини хвойних порід в об'ємі дерев'яних колон при їх нагріванні в середовищі високих температур.

Дослідження виконувалися в такій послідовності.

1. Спочатку була виконана апроксимація значень міцності та деформативності деревини аналітичними залежностями.

2. Після цього за розрахованими у п.4.1. температурами, розподіленими в об'ємі тіла колон, в залежності від часу нагріву, встановили величини відповідних фізико-механічних характеристик в об'ємі колон.

Для апроксимації залежностей зміни фізико-механічних властивостей деревини від температури були використані представлені в [35] дані.

Ці залежності відображали зміну величин коефіцієнтів зниження міцності  $K_\theta$  (рис. 4.3) та модулів деформації  $K_E$  (рис. 4.4) від температури  $\theta$ . Крім того, ці залежності являються лінійними функціями з яскраво вираженими точками перегину при температурі  $\theta = 100^\circ\text{C}$ . – температури випаровування вільної води з деревини. Для їх апроксимації були використані ступінчасті функції Хевісайда [104].

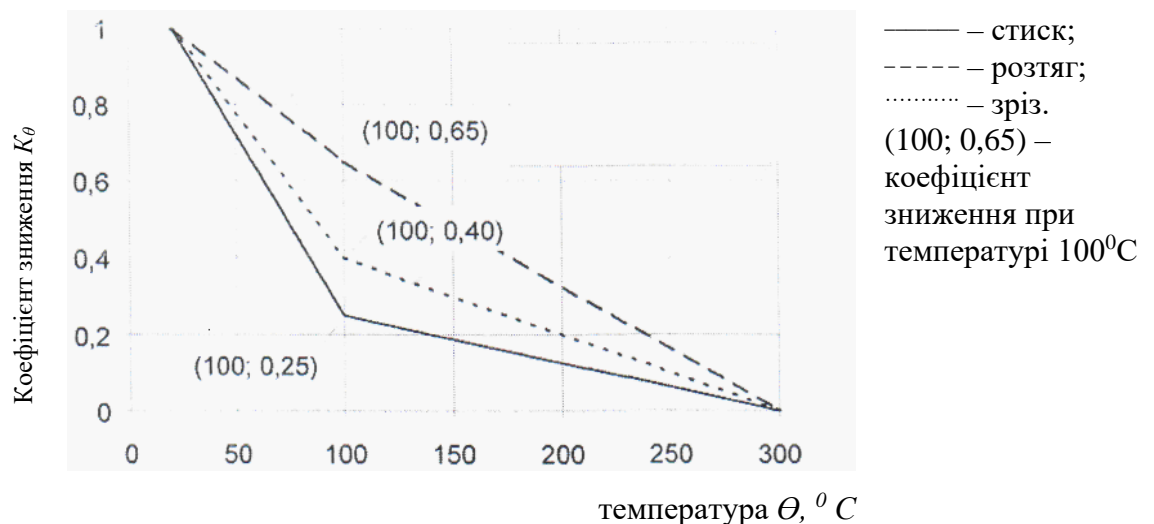


Рис. 4.3. Залежності зміни коефіцієнтів зниження міцності  $K_\theta$  деревини на стиск, розтяг і зріз від температури.

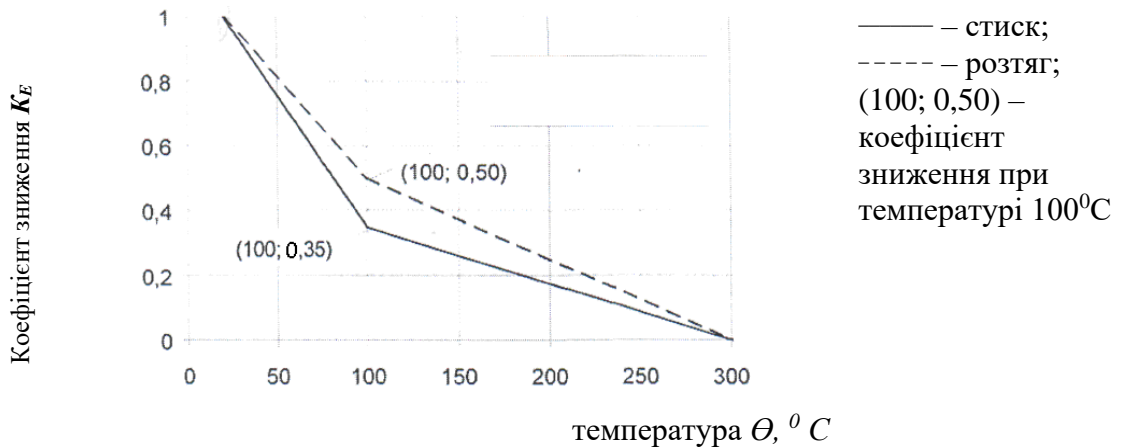


Рис. 4.4. Залежності зміни коефіцієнтів зниження модуля деформації  $K_E$  деревини при стиску і розтягу від температури.

Враховуючи вище сказане, були отримані наступні залежності для коефіцієнтів зміни міцності деревини від температури:

$$\left. \begin{aligned} k_{\theta,c} &= [1 - U(\theta - 20)] + \left[ \frac{U(\theta - 20) - U(\theta - 100)}{-U(\theta - 100)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{4,375}{1000} \cdot (\theta - 20) \right] + \\ &+ [U(\theta - 100) - U(\theta - 300)] \cdot [0,65 - 0,00325 \cdot (\theta - 100)]; \\ k_{\theta,t} &= [1 - U(\theta - 20)] + \left[ \frac{U(\theta - 20) - U(\theta - 100)}{-U(\theta - 100)} \right] \cdot [1 - 0,0075 \cdot (\theta - 20)] + \\ &+ [U(\theta - 100) - U(\theta - 300)] \cdot [0,4 - 0,002 \cdot (\theta - 100)]; \\ k_{\theta,v} &= [1 - U(\theta - 20)] + \left[ \frac{U(\theta - 20) - U(\theta - 100)}{-U(\theta - 100)} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{9,375}{1000} \cdot (\theta - 20) \right] + \\ &+ [U(\theta - 100) - U(\theta - 300)] \cdot \left[ 0,25 - \frac{1,25}{1000} \cdot (\theta - 100) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

де:

$$k_{\theta,c} = \frac{f_{c,\theta}}{f_{c,20}} - \text{коефіцієнт зміни міцності деревини на стиск при температурі } \theta;$$

$$k_{\theta,t} = \frac{f_{t,\theta}}{f_{t,20}} - \text{те ж, на розтяг при температурі } \theta;$$

$$k_{\theta,v} = \frac{f_{v,\theta}}{f_{v,20}} - \text{те ж, на зріз при температурі } \theta;$$

$f_{c,\theta}$ ,  $f_{t,\theta}$ ,  $f_{v,\theta}$  - фактичні міцності деревини на стиск, розтяг та зріз при температурі  $\theta$  відповідно;

$f_{c,20}$ ,  $f_{t,20}$ ,  $f_{v,20}$  - те ж, при температурі  $20$   $^{\circ}\text{C}$ ;

$U(x)$  - функція Хевісайда [94,95,104,105];

$\theta \equiv \theta(x, y, z, t)$  - температура в розрахунковій точці колони.

Були також отримані залежності коефіцієнтів зміни модуля деформації деревини від температури:



$$\left. \begin{aligned} k_{E,c} &= [1 - U(\theta - 20)] + \left[ \frac{U(\theta - 20) - U(\theta - 100)}{-U(\theta - 100)} \right] \cdot [1 - 0,00625 \cdot (\theta - 20)] + \\ &+ [U(\theta - 100) - U(\theta - 300)] \cdot [0,5 - 0,0025 \cdot (\theta - 100)]; \\ k_{E,t} &= [1 - U(\theta - 20)] + \left[ \frac{U(\theta - 20) - U(\theta - 100)}{-U(\theta - 100)} \right] \cdot [1 - 0,008125 \cdot (\theta - 20)] + \\ &+ [U(\theta - 100) - U(\theta - 300)] \cdot [0,35 - 0,00175 \cdot (\theta - 100)]. \end{aligned} \right\} (4.3)$$

Де,  $k_{E,c} = \frac{E_{c,\theta}}{E_{c,20}}$  – коефіцієнти зміни модуля деформації деревини для стиску при температурі  $\theta$ ;

$k_{E,t} = \frac{E_{t,\theta}}{E_{t,20}}$  – те ж, для розтягу при температурі  $\theta$ ;

$E_{c,\theta}$ ,  $E_{t,\theta}$  – фактичні модулі деформації деревини для стику і розтягу при температурі  $\theta$  відповідно;

$E_{c,20}$ ,  $E_{t,20}$  – те ж, при температурі 20 °С.

Отримані теоретичні залежності зміни міцності та модуля деформації деревини від температури нагріву дозволили визначити міцність і модуль деформації в будь-якій точці колони, як функцію від температури.

Рівняння (4.2) було складним, тому його було складно «вмонтувати» в сучасні обчислювальні комплекси.

У зв'язку з цим, для спрощення обчислень (яке дозволяється при інженерних розрахунках), схеми для розрахункових перетинів були подані у вигляді ступінчастої лінії (рис.4.5) по ширині перерізу колони  $b$ .

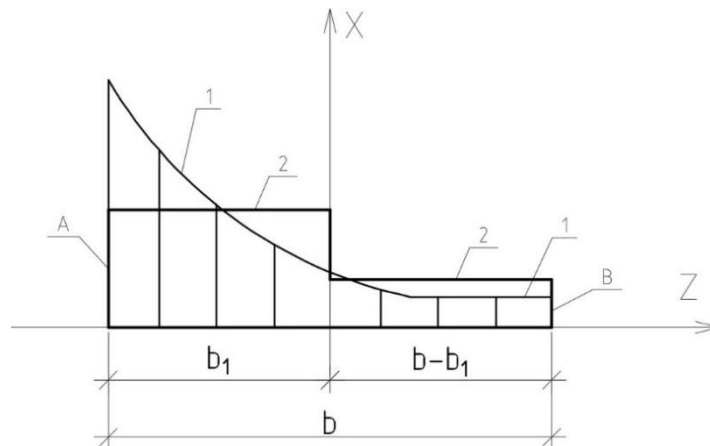


Рис. 4.5. До апроксимації фактичних епюр ступінчастою лінією.

1 - фактична епюра; 2 - те ж, апроксимація.

Примітка. Вісь 0X збігається з нейтральною віссю колони по висоті

Тому необхідно приводити до середнього значення температури і температурних залежностей в деякому об'ємі з координатами центру заданого шару матеріалу (при використанні для вирішення поставленого завдання методу кінцевих елементів) і в деякому перетині колони з координатою «X». З урахуванням сказаного і представленої на рис.4.5 схеми для довільного перерізу отримаємо:

1. Для визначення температури:

$$\left. \begin{aligned} \bar{T} &= \frac{\int_{-Dx/2}^{Dx/2} \int_{-Dy/2}^{Dy/2} \int_{-Dz/2}^{Dz/2} T(x,y,z,t) \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{Dx \cdot Dy \cdot Dz} \\ a_T &= \frac{\int_0^h \int_0^{b_1} T(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{b_1 \cdot h}; \\ b_T &= \frac{\int_0^h \int_{b-b_1}^b T(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{(b-b_1) \cdot h}; \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

2. Для визначення міцності деревини на стиск:

$$\left. \begin{aligned} \bar{f}_c &= \frac{\int_{-Dx/2}^{Dx/2} \int_{-Dy/2}^{Dy/2} \int_{-Dz/2}^{Dz/2} f_c(x,y,z,t) \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{Dx \cdot Dy \cdot Dz}; \\ a_{f_c} &= \frac{\int_0^h \int_0^{b_1} f_c(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{b_1 \cdot h}; \\ b_{f_c} &= \frac{\int_0^h \int_{b-b_1}^b f_c(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{(b-b_1) \cdot h}; \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

3. Для визначення міцності деревини на розтяг:

$$\left. \begin{aligned} \bar{f}_t &= \frac{\int_{-Dx/2}^{Dx/2} \int_{-Dy/2}^{Dy/2} \int_{-Dz/2}^{Dz/2} f_t(x,y,z,t) \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{Dx \cdot Dy \cdot Dz}; \\ a_{f_t} &= \frac{\int_0^h \int_0^{b_1} f_t(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{b_1 \cdot h}; \\ b_{f_t} &= \frac{\int_0^h \int_{b-b_1}^b f_t(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{(b-b_1) \cdot h}; \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

4. Для визначення міцності деревини на зріз:

$$\left. \begin{aligned} \bar{f}_v &= \frac{\int_{-Dx/2}^{Dx/2} \int_{-Dy/2}^{Dy/2} \int_{-Dz/2}^{Dz/2} f_v(x,y,z,t) \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{Dx \cdot Dy \cdot Dz}; \\ a_{f_v} &= \frac{\int_0^h \int_0^{b_1} f_v(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{b_1 \cdot h}; \\ b_{f_v} &= \frac{\int_0^h \int_{b-b_1}^b f_v(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{(b-b_1) \cdot h}; \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

5. Для визначення модуля пружності деревини на стиск:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_c &= \frac{\int_{-Dx/2}^{Dx/2} \int_{-Dy/2}^{Dy/2} \int_{-Dz/2}^{Dz/2} E_c(x,y,z,t) \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{Dx \cdot Dy \cdot Dz}; \\ a_{E_c} &= \frac{\int_0^h \int_0^{b_1} E_c(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{b_1 \cdot h}; \\ b_{E_c} &= \frac{\int_0^h \int_{b-b_1}^b E_c(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{(b-b_1) \cdot h}; \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

6. Для визначення модуля пружності деревини на розтяг:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_t &= \frac{\int_{-Dx/2}^{Dx/2} \int_{-Dy/2}^{Dy/2} \int_{-Dz/2}^{Dz/2} E_t(x,y,z,t) \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{Dx \cdot Dy \cdot Dz}; \\ a_{E_t} &= \frac{\int_0^h \int_0^{b_1} E_t(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{b_1 \cdot h}; \\ b_{E_t} &= \frac{\int_0^h \int_{b-b_1}^b E_t(x,y,z,t) \cdot dz \cdot dy}{(b-b_1) \cdot h}; \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Викладені в підрозділі 4.2 матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. Отримано аналітичний розв'язок задачі про розподіл міцностей деревини на стиск, розтяг та зріз в тілі нерівномірно, односторонньо нагрітої дерев'яної колони. В цьому випадку слід підставити розраховані за рівняннями температурні поля та отримані залежності для коефіцієнта зміни міцності деревини.

2. Отримано аналітичний розв'язок задачі щодо деформаційних властивостей (модуля деформацій) при стиску і розтязі в перетинах нерівномірно нагрітої дерев'яної колони. В цьому випадку слід підставити розраховані температурні поля та отримані залежності для коефіцієнта зміни модуля деформацій деревини .

3. Запропоновано для інженерних розрахунків використовувати спрощений підхід до використання коефіцієнта зміни міцнісних і деформаційних характеристик деревини у вигляді двоступінчастих функцій.

#### **4.1. РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПІД ЧАС ЛОКАЛЬНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ ТА ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

У цьому підрозділі представлені матеріали досліджень, необхідні для визначення напружено-деформованого стану дерев'яних колон, які знаходяться під дією стискаючого навантаження, та впливу нерівномірного нагрівання з вигорянням тіла колони.

Під час виконання досліджень була поставлена мета - оцінити вплив на деформації та несучу здатність колон наступних факторів (рис.4.6):

1. Силового навантаження (вертикальної стискаючої сили 90 кН) прикладеної по центральній осі колон без ексцентриситету;
2. Спільного впливу силового навантаження (вертикальної стискаючої сили 90 кН) і теплового розширення матеріалу колони;
3. Силового навантаження (вертикальної стискаючої сили 90 кН) з врахуванням зміни деформаційних властивостей деревини під впливом локального нагрівання матеріалу колони [11];
4. Силового навантаження (вертикальної стискаючої сили 90 кН) і зміни геометрії поперечного перерізу колони внаслідок вигоряння деревини.
5. Спільного врахування перерахованих вище факторів.

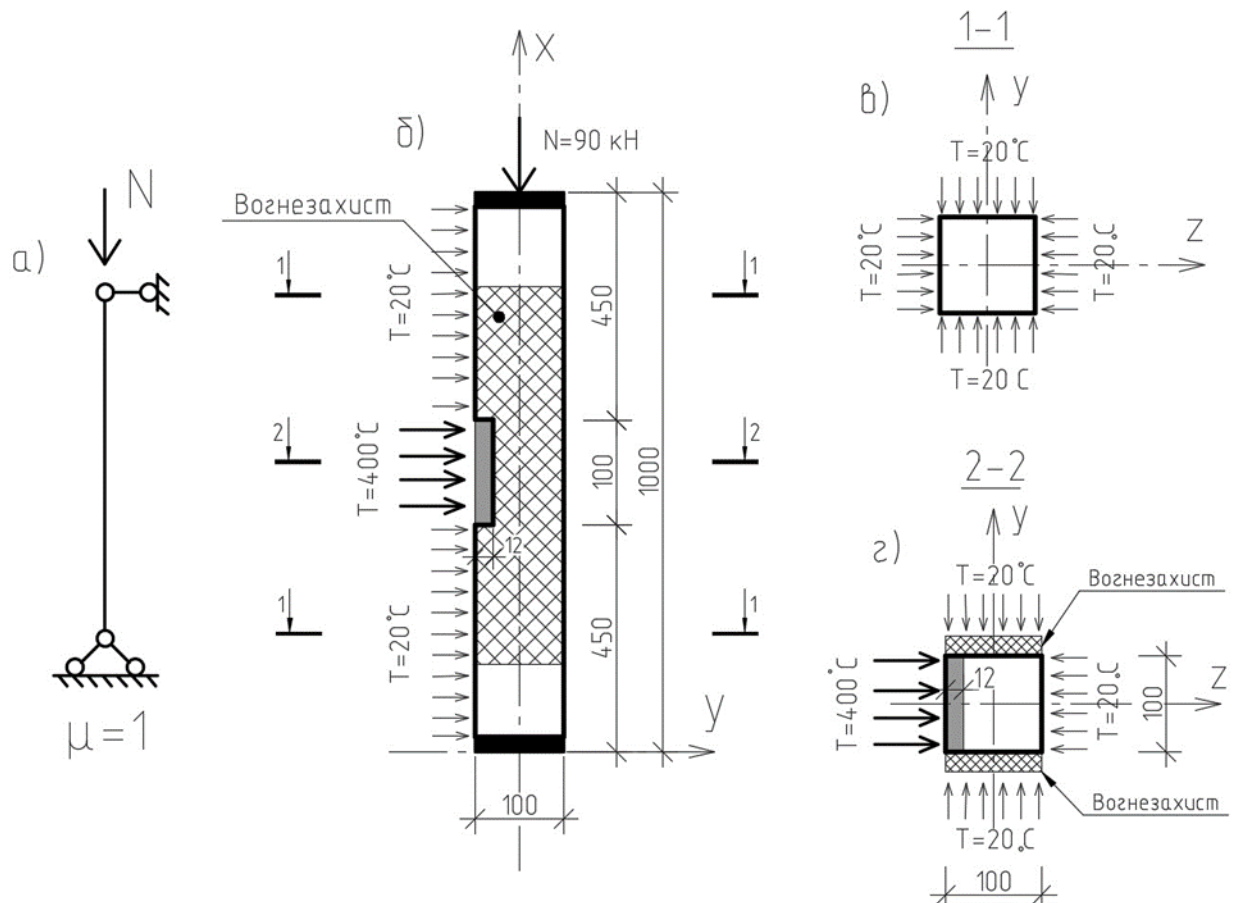


Рис. 4.6. Вихідні дані для визначення напружено-деформованого стану колони; а) розрахункова схема колони; б) геометричні параметри колони; в) розріз 1-1; г) розріз 2-2.

*Примітка: сірим кольором позначено зону вигорання деревини.*

Для визначення напружено-деформованого стану колони в розрахунковому перерізі, що знаходиться під навантаженням зосередженою силою  $N$ , була використана модель лінійного пружного середовища [76] і метод скінченних елементів.

Для визначення напружено-деформованого стану колони від дії температури була використана модель лінійної термопружності середовища (точніше, елементи теорії невзаємопов'язаних термопружностей) [106] і метод скінченних елементів. При цьому розподіл температури в межах колони розраховувався з використанням отриманих рівнянь в п.4.1.

Для визначення зміни властивостей матеріалу колони під впливом температурного поля, були використані залежності модуля деформації

деревини від температури (п.4.4.2) і розраховані з використанням представлених рівнянь в п.4.1 температурні поля.

Для визначення напружено-деформованого стану колони, що знаходиться під дією зосередженої сили, з врахуванням вигорання матеріалу деревини, була використана модель лінійного пружного середовища [76] і метод скінченних елементів.

Моделювання напружено-деформованого стану колони здійснювалося з використанням об'ємних кінцевих елементів.

Для визначення розрахункових значень температури в межах кожного з граничних елементів, були використані залежності (4.3). Для визначення розрахункових значень модулів пружності деревини з урахуванням нагріву в межах кожного з граничних елементів, були використані залежності (4.7) і (4.8).

На рис. 4.7 представлені кінцево-елементні моделі колон із вказаним значенням вертикальної зосередженої сили.

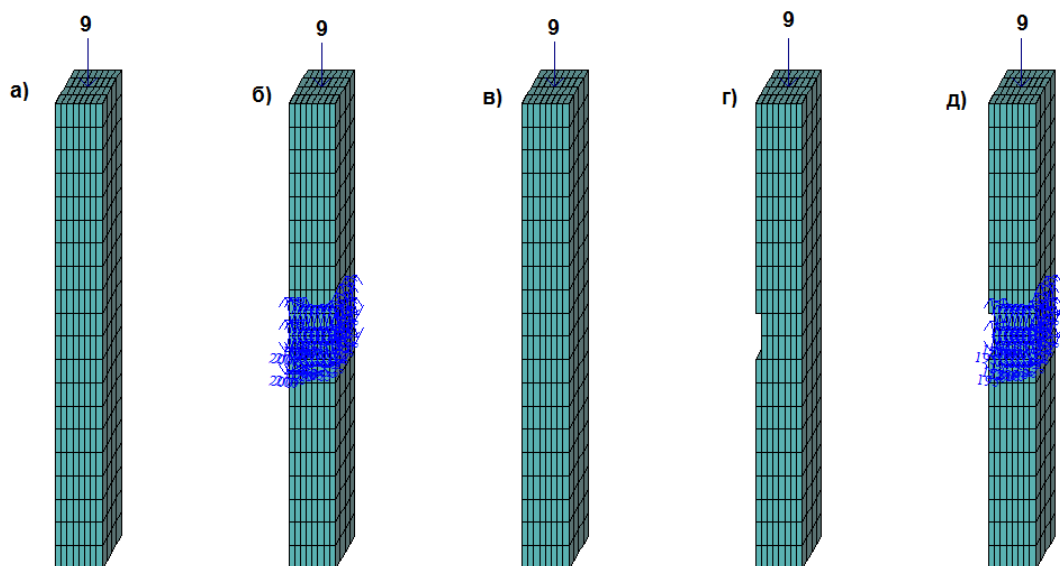


Рис. 4.7. Кінцево-елементні моделі колони.

- а) без нагріву; б) при локальному нагріві з урахуванням температурного розширення матеріалу колони; в) з урахуванням зміни модуля пружності деревини від температури; г) з урахуванням вигорання деревини; д) з урахуванням перерахованих в пунктах а-г факторів.

На рис. 4.8 представлені жорсткості об'ємних кінцевих елементів моделі колони в залежності від температури нагріву.

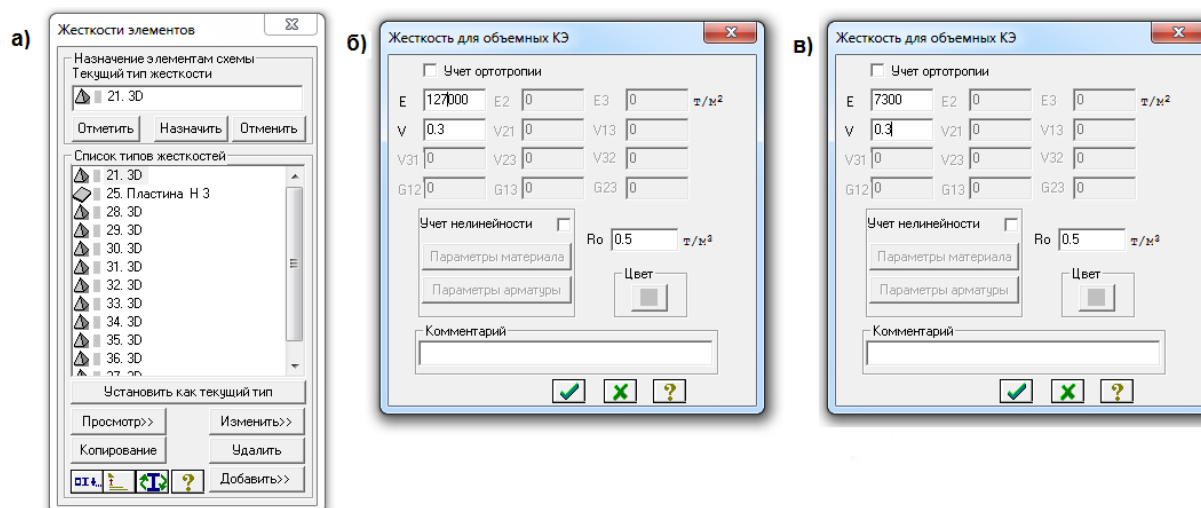


Рис. 4.8. Жорсткості об'ємних кінцевих елементів моделі колони:  
а) загальний список; б) при температурі 20 °С; в) при температурі 200 °С

На рис. 4.9 представлено температурне навантаження на колону в одній з розрахункових областей і значення коефіцієнтів лінійного температурного розширення за напрямками.

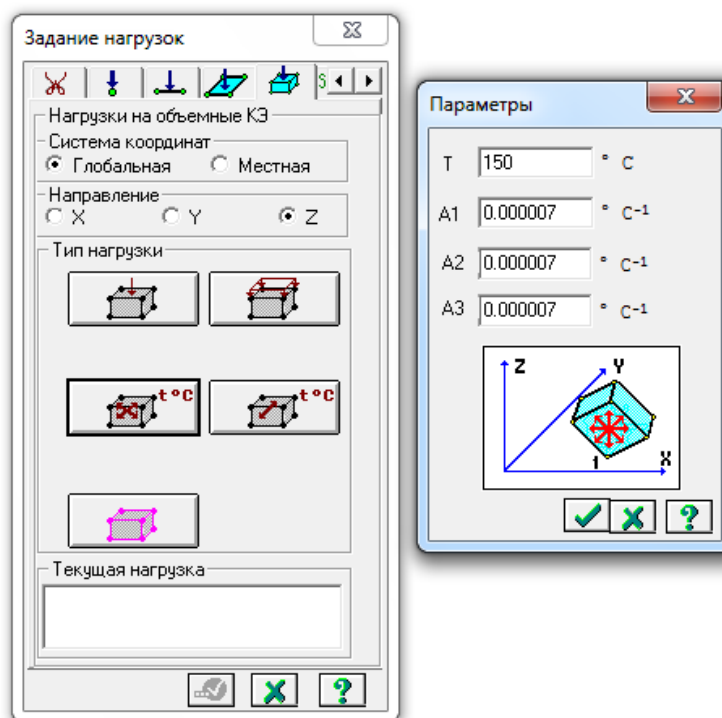


Рис. 4.9. Температурне навантаження на колону та коефіцієнти лінійного температурного розширення при 150 °С

Оскільки температурні залежності модулів деформації деревини на стиск і розтяг відрізняються один від одного, тому в ході розрахунків були використані їхні середні значення, розраховані за формулою:

$$E = \frac{E_c + E_f}{2}. \quad (4.10)$$

При виконанні розрахунків визначалися максимальні вертикальні (рис. 4.10) та горизонтальні (рис. 4.11) переміщення колони, які порівнювалися залежно від факторів впливу.

На основі цього були зроблені висновки про вплив кожного з розглянутих факторів в процес деформування колони.

Виявилось, що вертикальні переміщення колони в даному випадку мають наступні значення:

- для моделі «а»: - 6,52 мм;
- для моделі «б» - 6,21 мм;
- для моделі «в» - 11,2 мм;
- для моделі «г» - 7,84 мм;
- для моделі «д» - 12,00 мм.

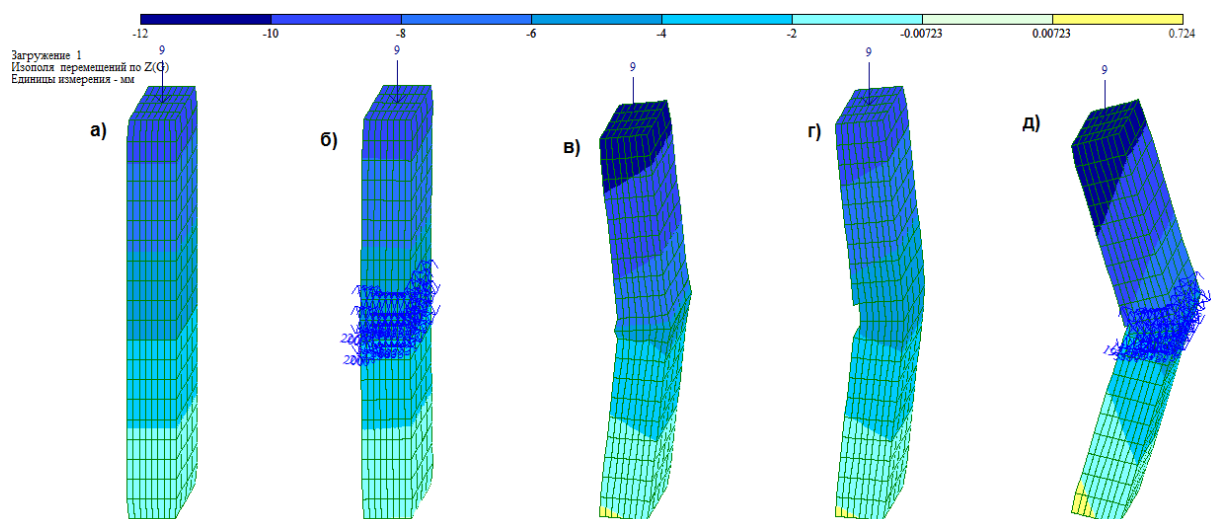


Рис. 4.10. Ізополю вертикальних переміщень колон (див. рис. 4.7)



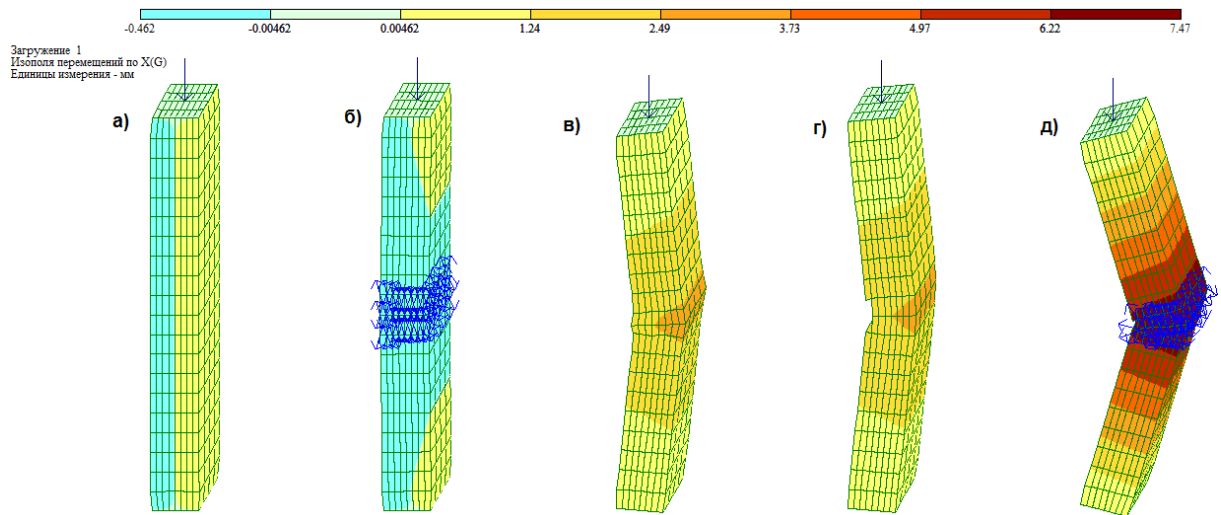


Рис. 4.11. Ізополю горизонтальних переміщень колон (див. рис. 4.7)

При цьому горизонтальні переміщення колони виявилися рівними:

- для моделі «а» - 0,147 мм;
- для моделі «б» - (- 0,462) мм;
- для моделі «в» - 3,53 мм;
- для моделі «г» - 3,26 мм;
- для моделі «д» - 7,47 мм.

Встановлено, що вертикальні переміщення колони мають найбільше значення для фактору впливу, представленого для моделі «д» (рис.4.10, д), а найменші - для фактору впливу, представленого для моделі «б» (рис.4.10, б).

Це пояснюється тим, що моделі «д» відповідає найбільше ослаблення перерізу колони (зменшення модуля деформації деревини частини перерізу колони в результаті її нагрівання і ослаблення перетину в результаті вигорання деревини).

Також виявилось, що горизонтальні переміщення колони мають найбільше значення для фактору впливу, представленого для моделі «д» (рис.4.11, д), а найменші - для фактору впливу, представленого для моделі «б» (рис. 4.11, б).

При цьому найменші переміщення зафіксовані для моделі, представленої на рис. 4.11, а.

Це пояснюється тим, що моделі «д», відповідає найбільше ослаблення перерізу колон, за рахунок зменшення модуля деформації деревини частини перерізу колони в результаті її нагрівання і ослаблення перетину в результаті вигорання деревини. Модуль пружності деревини колони зменшується при наближенні перерізу, що розглядається, до джерела нагріву. Тому, в даному випадку переміщення колони (вигин) спрямовані в бік, протилежний джерелу нагріву.

Інше спостерігається при дослідженні деформацій, обумовлених лише тепловим розширенням матеріалу колони, оскільки в цьому випадку розтягнуті волокна знаходилися з боку джерела нагріву.

Викладені в цьому підрозділі матеріали досліджень дозволили нам зробити наступні висновки:

1. На вертикальні деформації колони найбільший вплив мають такі чинники (в порядку спадання):

- зменшення модуля пружності деревини при зростанні температури нагріву колони;
- ослаблення перерізу колони в результаті вигорання її матеріалу;
- силові дії на колону;
- температурні деформації деревини.

2. На горизонтальні деформації колони найбільший вплив мають такі чинники (в порядку спадання):

- зменшення модуля пружності деревини при збільшенні температури нагріву колони;
- ослаблення перерізу колони в результаті вигорання її матеріалу;
- температурні деформації деревини;
- силові дії на колону.

Загалом, викладені в цьому підрозділі матеріали досліджень дозволили нам зробити висновок про те, що при впливі високої температури на дерев'яні конструкції під час визначення їх напружено-деформованого стану обов'язково слід враховувати такі фактори, як:

- зміна фізико-механічних властивостей деревини під впливом температури;
- зміна геометричних параметрів розрахункового перерізу (площі поперечного перерізу) дерев'яних конструкцій за рахунок вигорання деревини та поява ексцентриситету від вигорання.

#### 4.4. ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКОВИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПІД ЧАС ЇХНЬОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЛОКАЛЬНОГО НАГРІВУ

У цьому розділі представлені матеріали досліджень, спрямованих на порівняння експериментальних (розділ 2) та розрахованих, з використанням методики [35] і запропонованої нами методики (розділ 4.5), переміщень дерев'яних колон (табл. 4.1) та рис.4.12 та 4.13.

Вертикальні і горизонтальні переміщення колони

Таблиця 4.1.

N п.п.	Марка колони	Навантаження N, кН	Модуль пружності, $E \cdot 10^{-2}, \text{т/м}^2$	Вертикальне переміщення верху колони $\Delta z$ , мм			Горизонтальне переміщення середини колони $\Delta u$ , мм		
				Експеримент $\Delta z^{ex}$	Розрахункові		Експеримент	Розрахункові	
					Існуюча методика $\Delta z_N$	Пропонована методика $\Delta z_M$		Існуюча методика $\Delta u_N$	Пропонована методика $\Delta u_M$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	K2.1	90	1260	11.14	7.7	10.42	6.34	4.38	6.49
2	K2.2	90	1377	10.24	6.64	8.99	5.47	3.55	5.6
3	K2.3	90	1347	10.49	6.8	9.21	5.6	3.63	5.73
4	K2.4	90	1420	8.05	6.48	8.77	5.33	4.29	5.46

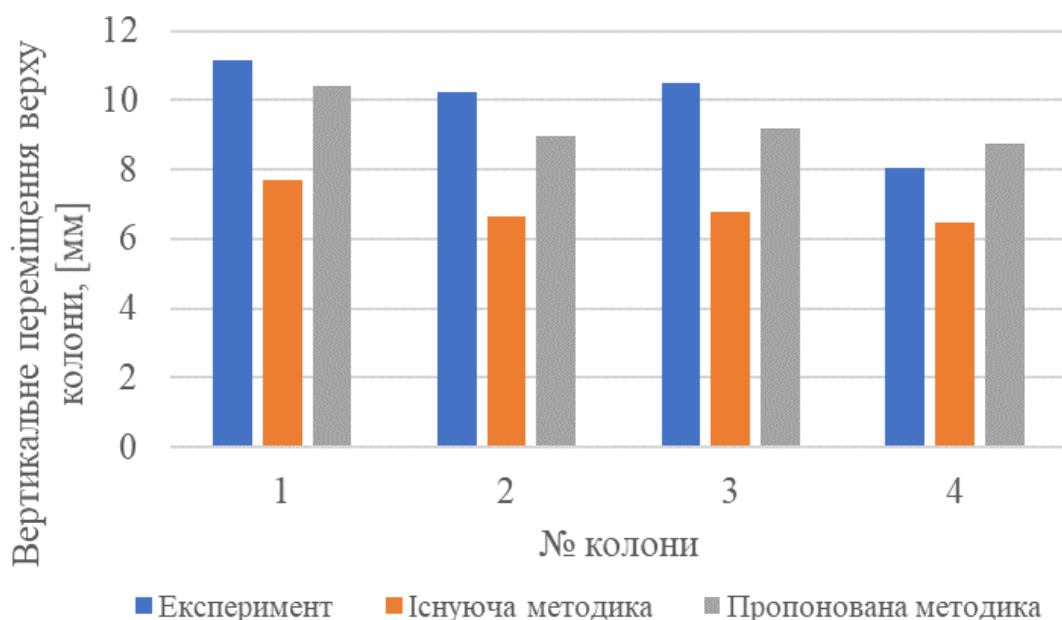


Рис. 4.12. До розрахунку вертикальних переміщень дерев'яних колон.

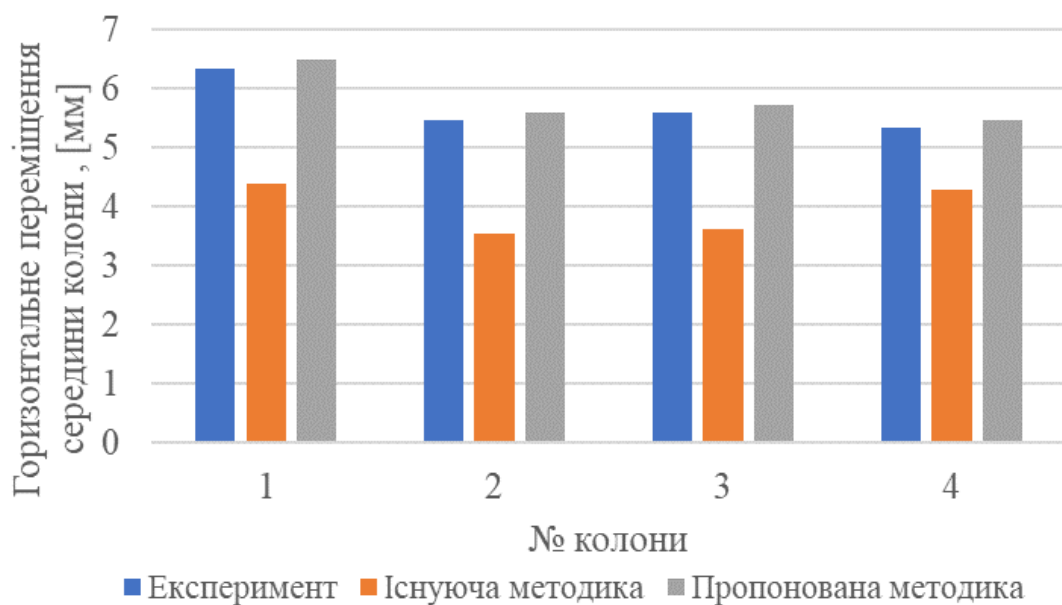


Рис. 4.13. До розрахунку горизонтальних переміщень дерев'яних колон.

Як вихідні дані, були використані, представлені в розділі 4.3 дані і експериментальні значення модуля пружності деревини колони.

Для кожної з випробуваних колон модуль пружності визначався за експериментальною діаграмою «вертикальна деформація - навантаження».

В ході порівняння натурних і розрахункових переміщень визначалися такі характеристики:

- відносне середнє квадратичне відхилення між експериментальними і розрахунковими переміщеннями, а також максимальна відносна похибка.

Були отримані такі результати:

1. Максимальна розбіжність між розрахованими за методикою ДБН і експериментальними вертикальними переміщеннями становила 54%.

При цьому середнє квадратичне відхилення між розрахованими за методикою ДБН і експериментальними вертикальними переміщеннями становило 44%.

2. Максимальна розбіжність між розрахованими за запропонованою методикою і експериментальними вертикальними переміщеннями склала 12%, що менше 15%, прийнятих для дослідження будівельних конструкцій

При цьому середнє квадратичне відхилення між розрахованими за запропонованою методикою і експериментальними вертикальними переміщеннями становило 9%.

3. Максимальна розбіжність між розрахованими за запропонованою методикою і експериментальними горизонтальними переміщеннями становила 9%.

При цьому середнє квадратичне відхилення між розрахованими за запропонованою методикою і експериментальними горизонтальними переміщеннями склало 2%.

Отримані з використанням запропонованої методики результати виявилися більш точними в порівнянні з отриманими за методикою ДБН за рахунок більш повного врахування різних факторів та впливів. Основними факторами підвищення точності розрахунку стало врахування ослаблення розрахункових перерізів колони за рахунок термодеструкції деревини (вигорання) і зменшення модуля пружності при високих температурах.

В ході подальших досліджень нами були розраховані час початку горіння матеріалу дерев'яних колон, захищених від теплового впливу гіпсокартоном. Для розрахунку була використана залежність (4.21).

Теплофізичні властивості матеріалу колони і гіпсокартону представлені в табл. 4.2.

Теплофізичні властивості матеріалу колони і теплового захисту

Таблица 4.2.

Назва матеріалу	Характеристика матеріалу в сухому стані			Розрахункове масове співвідношення вологи в матеріалі	
	Густина	Приведена теплоємність	Коефіцієнт теплопровідності		
	$\gamma, \text{кг/м}^3$	$c_{ред}, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$W, \%$	
Умови експлуатації	-	-	-	А	Б
Гіпсокартон	800	0.84	0.15	4	6
Сосна, ялиця вздовж волокон	500	2.3	0.18	15	20
Сосна, ялиця поперек волокон	500	2.3	0.09	15	20

Коефіцієнт безпеки прийнятий рівним 0,9 [35], а коефіцієнт умов роботи - 1,0.

Результати розрахунків (ряд 1) і експериментальні дані представлені на рис. 4.14.

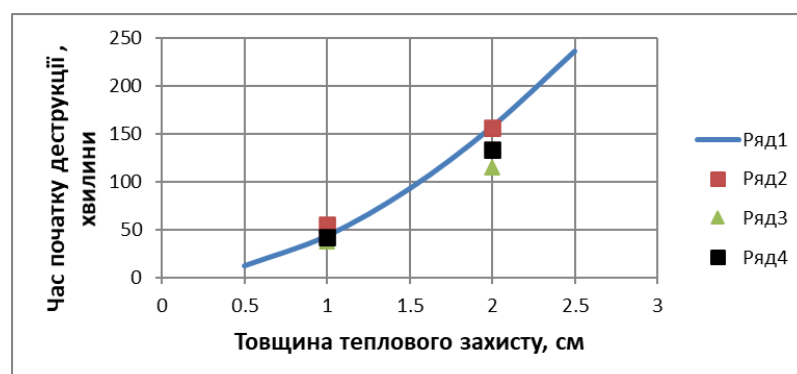


Рис. 4.14. До розрахунку початку горіння матеріалу дерев'яних колон, захищених від теплового впливу гіпсокартоном.

Ряд 1 - розрахунок за пропонованою методикою; ряди 2, 3 і 4 - експеримент.

За температуру початку горіння деревини була прийнята температура спалаху деревини, а саме  $220^\circ\text{C}$ .

Виявилося, що максимальна відмінність між розрахунковим і фактичним часом початку горіння деревини складає 30%, а середнє квадратичне відхилення - 21%.

Був зроблений висновок про те, що в першому наближенні ці результати можна визнати задовільними.

Запропонована методика розрахунку напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій дозволяє отримати більш точні результати, ніж методика [35] і тому може бути використана для вирішення практичних завдань проектування дерев'яних будівельних конструкцій, які працюють в умовах локальних високотемпературних впливів.

Практичне застосування має запропонована методика визначення часу початку горіння теплоізольованих конструкцій, оскільки в цьому випадку з'явилася можливість обґрунтовано вибирати матеріал вогнезахисту і його товщину.

#### **4.5. ПРАКТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ ВОГНЕВОМУ ВПЛИВІ**

В чинних нормах [8], запропоновані два методи спрощеного розрахунку: метод приведенного поперечного перерізу та метод приведених характеристик.

Для розрахунку обрано дерев'яну колону перерізом 100x100 мм, завдовжки 1000 мм. Центральне зосереджене розрахункове навантаження на колону – 90 кН.

Колона виконана із деревини класу С30 та згідно табл.Б.1 [7] має наступні характеристики:

$$\text{Густина: } \rho_k = 400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\text{Модуль пружності вздовж волокон: } E_{0,mean} = 12000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

Моделювання пошкодження виконано на ділянці по середині колони висотою 100 мм.

Швидкість обвуглювання деревини прийнято – 1 мм/хв.

Глибина обвуглювання прийнята як середнє значення з експериментів - 20 мм.

#### 4.5.1. РОЗРАХУНОК МЕТОДАМИ ОПИСАНИМИ В НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТАХ

- Розрахунок методом приведенного перерізу

Метод приведенного перерізу є рекомендованою методикою розрахунку згідно [8], він полягає в зменшенні початкового перерізу на робочу глибину обвуглювання  $d_{ef}$  (рис.4.15):

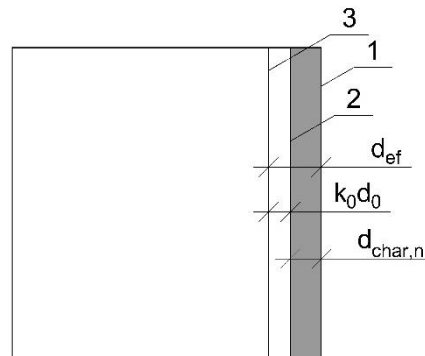


Рис.4.15. Визначення залишкового і робочого поперечного перерізу:

1 – початкова поверхня елемента; 2 – межа залишкового перерізу; 3 – межа робочого поперечного перерізу.

Робоча глибина обвуглювання визначається згідно виразу:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0,$$

де,  $d_0$  – товщина шару поверхні з міцністю та жорсткістю, що дорівнюють нулю, приймають рівною 7 мм;

$d_{char,n}$  – умовна глибина обвуглювання;

$k_0$  – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від тривалості горіння та наявності захисту поверхні.

Коефіцієнт  $k_0$  – має лінійну залежність від часу, який відповідає часу початку обвуглювання  $t_{ch}$  та наявності додаткового захисту поверхні деревини (рис.4.16).



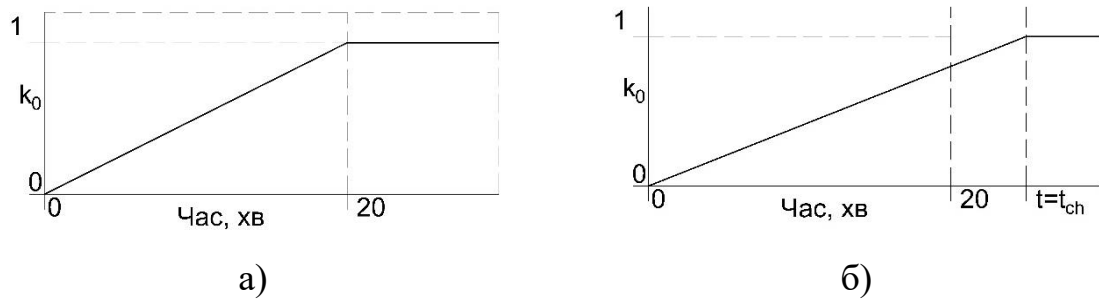


Рис.4.16. Залежність коефіцієнту  $k_0$  із плином часу, для:

- а) – для незахищених елементів та захищених при  $t_{ch} \leq 20$  хв; б) – для захищених елементів при  $t_{ch} \geq 20$  хв.

Глибина обвуглювання  $d_{char,n}$  залежить від швидкості обвуглювання деревини та визначається згідно із п.3.4.2 [8].

Подальший розрахунок виконаний, як для стиснутого дерев'яного перерізу із урахуванням постійної зміни поперечного перерізу (розділ 9, [7]). Для розрахункових характеристик приймають коефіцієнт зміни  $k_{mod,fi} = 1,0$ .

Розрахункове сумарне нормальне напруження, яке виникає в перерізі, знаходимо із наступних виразів:

при  $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$ :

$$\sigma_{max} = \sigma_{c,0,d}^2 + \sigma_{m,y,d}$$

при  $\lambda_{rel,y} > 0,3$ :

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}} + \sigma_{m,y,d}$$

де,  $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{net}}$  – розрахункове напруження стиску вздовж волокон;

$N_d = 90$  кН – розрахункове зусилля стиску вздовж волокон;

$A_{net}$  – розрахункова площа перерізу елемента із урахуванням пошкодження;

$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{y,net}}$  – розрахункові напруження при згині із урахуванням

деформованої схеми;

$M_{y,d} = N_d \cdot \frac{d_{ef}}{2}$  – розрахунковий момент, який виникає внаслідок

ексцентриситету при послабленні перерізу;

$W_{y,net}$  –момент опору перерізу із пошкодженням;

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \text{ –коєфіцієнт повздовжнього згину};$$

$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$  – безрозмірний коєфіцієнт;

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \text{ –приведена гнучкість елемента};$$

$\beta_c = 0,1$  –безрозмірний коєфіцієнт для клеєної деревини;

$$\lambda_y = \frac{l_{ef}}{i} \text{ –гнучкість елемента};$$

$f_{c,0,k} = 23$  МПа –характеристичне значення міцності деревини при стиску вздовж волокон для деревини С30;

$E_{0,05} = 8000$  МПа –п'ятивідсотковий квантиль модуля пружності вздовж волокон для деревини С30;

$l_{ef} = l$  –розрахункова довжина колони;

$i$  –радіус інерції перерізу.

Отримані результати зведені у табл.4.3 та на рис.4.17.

Результати розрахунку напружень колони під впливом пошкодження від дії високих температур методом приведеного перерізу

Таблиця 4.3

$d_{ef}$ [мм]	$t$ [хв]	$\lambda_y$	$\lambda_{rel,y}$	$k_y$	$k_{c,y}$	$\sigma_{c,0,d}$ [МПа]	$\sigma_{m,y,d}$ [МПа]	$\sigma_{max}$ [МПа]	% завантаження
0,00	0,00	34,64	0,59	0,70	0,92	9,00	0,00	9,00	33.99
2,50	2,78	35,53	0,61	0,71	0,92	9,23	0,75	10,83	37.07
5,00	5,56	36,46	0,62	0,73	0,91	9,47	1,67	12,08	40.68
7,50	8,33	37,45	0,64	0,74	0,90	9,73	2,80	13,58	44.95
10,00	11,11	38,49	0,66	0,75	0,90	10,00	4,22	15,38	50.08
12,50	13,89	39,59	0,68	0,77	0,89	10,29	6,00	17,59	56.30
15,00	16,67	40,75	0,70	0,78	0,88	10,59	8,27	20,31	63.94
17,50	19,44	41,99	0,72	0,80	0,87	10,91	11,18	23,73	73.48
20,00	23,64	43,30	0,74	0,82	0,86	11,25	15,00	28,11	85.60

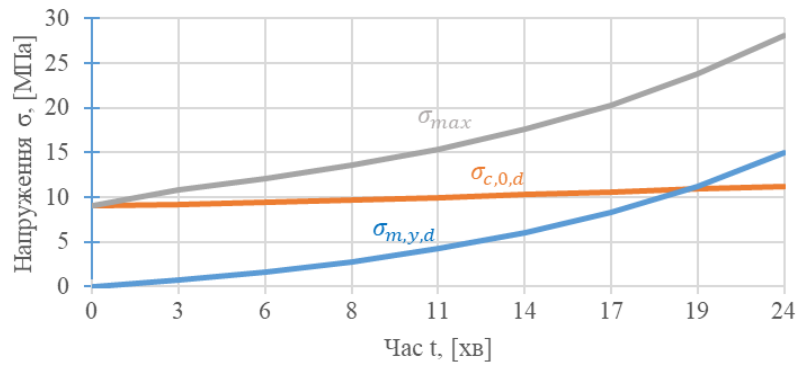


Рис.4.17. Графік залежності напружень  $\sigma$  обчислених методом приведенного перерізу від часу  $t$ .

• **Розрахунок методом приведених характеристик**

Метод приведених характеристик полягає в заміні перехідного коефіцієнту  $k_{mod,fi}$  для кожного із типу характеристик:

- для міцності на згин:  $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \cdot \frac{p}{A_r}$ ;

- для міцності на стиск:  $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{p}{A_r}$ ;

- для міцності на розтяг та модуля пружності:  $k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \cdot \frac{p}{A_r}$ ;

де,  $p$  – периметр залишкового поперечного перерізу, що зазнає вогневого впливу;

$A_r$  – площа залишкового поперечного перерізу.

Подальший розрахунок виконано як для стиснутого дерев'яного стержня. Отримані результати зведені у табл.4.4 та на рис.4.18.

Результати розрахунку напружень колони під впливом пошкодження від дії високих температур методом приведених характеристик

Таблиця 4.4

$d_{ef}$ [мм]	$d_{char}$ [мм]	$t$ [хв]	$\lambda_{rel,y}$	$k_{c,y}$	$k_{mod,fi}$ <i>comr</i>	$\sigma_{c,0,d}$ [МПа]	$k_{mod,fi}$ <i>bend</i>	$\sigma_{m,y,d}$ [МПа]	$\sigma_{max}$ [МПа]	% завантаження
0,00	0,00	0.00	0.59	0.92	0.68	9.00	0.80	0.00	9	49.99
2,50	1,53	2.78	0.60	0.92	0.68	9.14	0.80	0.45	10.41	52.63
5,00	3,06	5.56	0.61	0.91	0.67	9.28	0.80	0.98	11.13	55.60
7,50	4,58	8.33	0.62	0.91	0.67	9.43	0.80	1.60	11.96	58.96
10,00	6,11	11.11	0.63	0.91	0.67	9.59	0.79	2.34	12.92	62.80
12,50	7,64	13.89	0.64	0.90	0.67	9.74	0.79	3.23	14.03	67.21
15,00	9,17	16.67	0.65	0.90	0.66	9.91	0.79	4.30	15.33	72.33
17,50	10,69	19.44	0.66	0.89	0.66	10.08	0.79	5.60	16.88	78.31
20,00	13,00	23.64	0.68	0.89	0.66	10.34	0.79	7.82	19.49	88.45

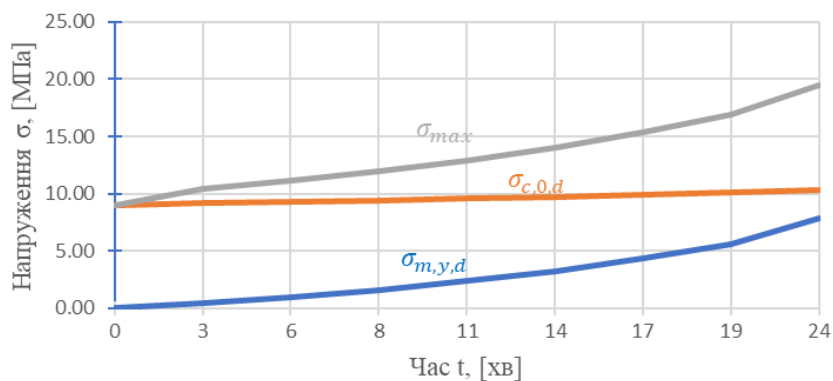


Рис.4.18 Графік залежності напружень  $\sigma$  обчислених методом приведених характеристик від часу  $t$ .

Порівнюємо отримані значення відсотку завантаження перерізу та максимального напруження в перерізі (рис.4.19 та 4.20).

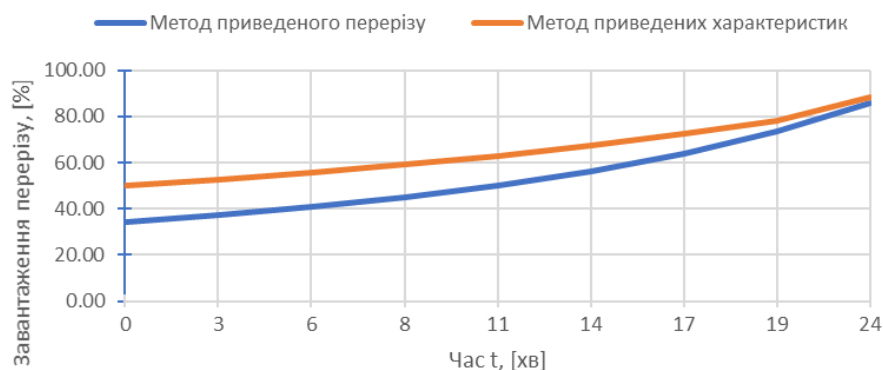


Рис.4.19 Порівняння відсотку завантаження перерізу від часу  $t$  при різних способах обчислення несучої здатності.

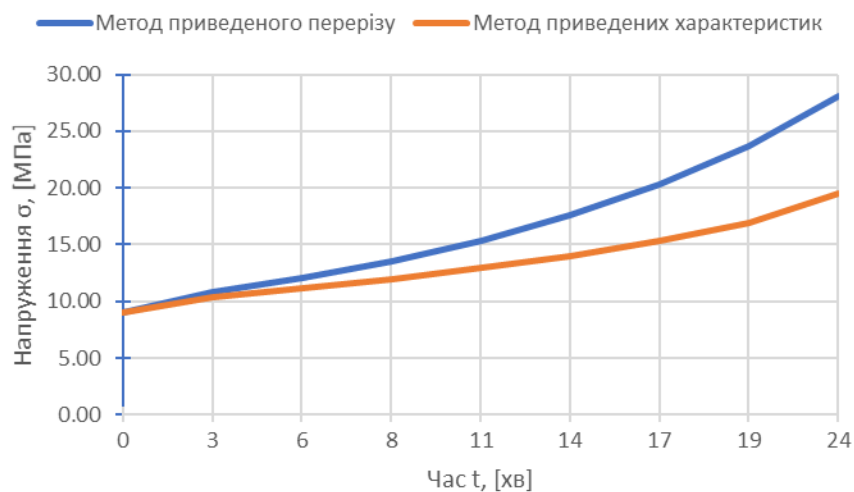


Рис.4.20 Порівняння максимального напруження в перерізі від часу  $t$  при різних способах обчислення несучої здатності.

#### 4.5.2. РОЗРАХУНОК МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕМЕНТІВ

Розрахунок методом скінченних елементів виконаний у вітчизняному програмному комплексі «Ліра».

Розрахункова модель – пластинчата плоска конструкція із різним розміром кінцевих елементів (рис.4.21). Сітка кінцевих елементів у місці пошкодження перерізу згущена до розміру кінцевого елемента 0.025 м.

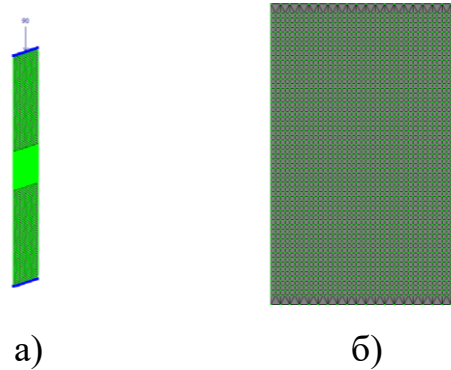


Рис.4.21. МСЕ модель колони:

а) загальний вигляд розрахункової схеми; б) фрагмент згущення сітки кінцевих елементів.

Для моделювання пошкодження перерізу деревини під час горіння використано інструмент «Монтаж» (рис.4.22). Поетапно із моделі вилучалися пошарово кінцеві елементи відповідного розміру, тим самим змінюючи переріз колони.



Рис.4.22 Вилучення скінченних елементів у інструменті «Монтаж»: а) елемент без пошкодження; б) моделювання пошкодження глибиною 2 см.

Було виконано порівняння результатів розрахунків методом скінченних елементів із методом приведенного перерізу, які по своїй суті застосовують ту ж методику зменшення перерізу внаслідок вигорання деревини.

Розрахунок методом скінчених елементів виконаний у ПК «Ліра» у лінійній постановці. Для аналізу та порівняння напружень використано інструмент «Літера», тобто розрахунок головних напружень.

Як видно із рис. 4.22 на краях локального пошкодження помітні концентратори напружень, тому розглянуто два перерізи:

- переріз всередині пошкодження -  $\sigma_{mid}^{FEM}$ ;
- переріз в місці концентратора напружень -  $\sigma_{ext}^{FEM}$  (враховано середнє значення в районі концентратора);

Результати подано у табл.4.5 та на рис.4.23, де виконано порівняння отриманих напружень методом скінчених елементів із напруженнями отриманими теоретичним шляхом.

Результати розрахунку напружень колони під впливом пошкодження від високих температур методом скінченних елементів

Таблиця 4.5

$d_{ef}$ [мм]	$t$ [хв]	$\sigma_{max}$ [МПа]	$\sigma_{mid}^{FEM}$ [МПа]	Похибка[ %]	$\sigma_{ext}^{FEM}$ [МПа]	Похибка[ %]
0,00	0,00	9,00	9	0,0	9	0,0
2,50	2,78	10,83	10,03	7,4	10,74	0,8
5,00	5,56	12,08	11,11	8,1	12,25	1,4
7,50	8,33	13,58	12,2	10,2	13,75	1,3
10,00	11,11	15,38	13,4	12,9	15,28	0,7
12,50	13,89	17,59	14,71	16,4	18	2,4
15,00	16,67	20,31	16,14	20,5	19,9	2,0
17,50	19,44	23,73	17,71	25,4	24,51	3,3
20,00	23,64	28,11	19,09	32,1	27,03	3,8

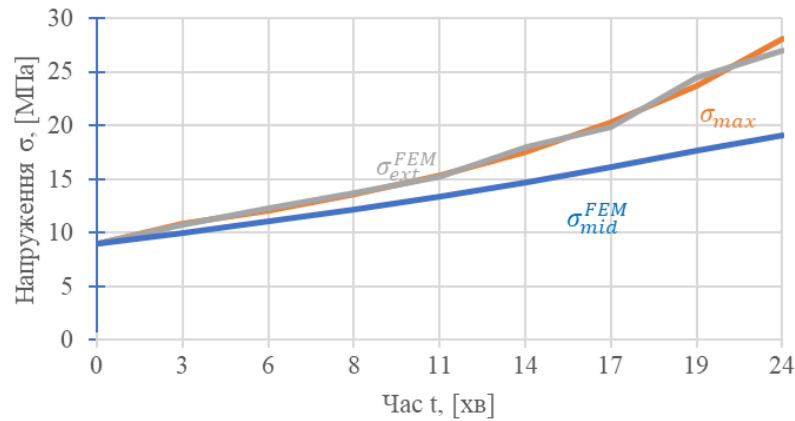


Рис.4.23. Графік залежності напружень  $\sigma$  обчислених методом скінченних елементів від часу  $t$ .

#### 4.6. РЕКОМЕНДАЦІЇ З РОЗРАХУНКУ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ПРИ ЇХ ЛОКАЛЬНОМУ ВОГНЕВОМУ ВПЛИВИ

У цьому розділі представлено рекомендації з розрахунку напружено-деформованого стану незахищених та захищених дерев'яних колон, що знаходяться під локальним впливом високої температури і зовнішнього навантаження з можливістю локальної термодеструкції тіла колони за рахунок вигорання деревини.

Розглядалися два випадки:

1. Дерев'яна конструкція не захищена теплоізоляцією.
2. Дерев'яна конструкція захищена теплоізоляцією.

Суть методики розрахунку полягала в наступному:

1. Силове і температурне навантаження на колону слід приймати відповідно до вимог [107].

- 1.1. Як додатковий вплив, слід враховувати деструкцію деревини за рахунок вигорання. Цей параметр слід уточнювати в технічному завданні на проектування та розрахунки конструкцій.

- 1.2. При визначенні напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій, які перебувають під впливом високих температур, обов'язково слід враховувати:

- силові дії на колону;

- зменшення міцності та модуля пружності деревини при зростанні температури нагріву колони;

- температурні деформації деревини;

- ослаблення перерізу колони в результаті вигорання деревини.

2. Механічні властивості деревини колони слід приймати відповідно до вимог [7] ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. При цьому обов'язково необхідно враховувати зменшення міцності деревини та її модуля пружності при зростанні температури нагріву.

Під час розрахунку дерев'яних конструкцій за деформаціями слід враховувати такі властивості:

- модуль пружності деревини при стисканні;

- модуль пружності деревини при розтягу.

При використанні для розрахунку напружено-деформованого стану колони моделі лінійного пружного ізотропного тіла матеріалу допускається приймати середнє значення модуля деформації. Для цього слід використовувати формулу:

$$E_{mean} = \frac{E_c + E_t}{2}, \quad (4.11)$$

де  $E_{mean}$  - середнє значення модуля деформації деревини колони.

2.1. Теплофізичні властивості матеріалу колони слід приймати відповідно до вимог [7]. Під час розрахунку слід використовувати такі характеристики:

- коефіцієнт теплопровідності;

- питому теплоємність;

- густину;

- коефіцієнт лінійного температурного розширення.

2.2. При визначенні температури всередині колони слід використовувати схему подану на рис. 4.24 і враховувати:

- температуру нагрівання;

- температуру на межі розрахункової області (температура поверхні конструкції);



- розміри і геометрію нагрітої області;
- зміну температури нагріву в часі;
- розміри колони (ширину і висоту її перетину, а також довжину).

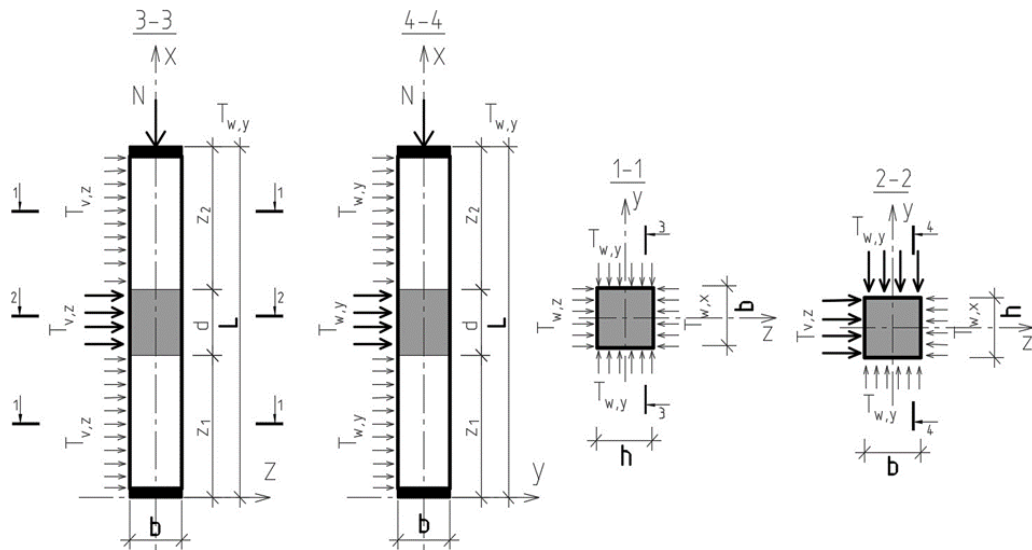


Рис. 4.24. Схема до визначення температурного поля всередині дерев'яної колони. *Примітка.* Сірим кольором виділена область колони, для якої виконується розрахунок температури за спрощеною схемою 2.3. У загальному випадку температуру в розрахунковій точці колони слід визначати з використанням рівнянь:

$$\begin{aligned}
 T(x, y, z, t) &= T_1(x, y, z, t) + T_2(x, y, z, t); \\
 T_1 &= T_w(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}^1(t) \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{aligned} \right]; \\
 A_{ijk}^1(t) &= -k_2 \cdot \int_0^t \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot e^{-k_1 \cdot (t-\tau)} + C_{ijk} \cdot e^{-k_1 \cdot t}; \\
 C_{ijk} &= \frac{8}{b \cdot h \cdot L} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} &T_0(x, y, z) - \\ &-T_w(0) \end{aligned} \right] \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{aligned} \right] \cdot dx \cdot dy \cdot dz; \\
 T_2(x, y, z, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_{ijk}^*(t) \cdot \left(1 - \frac{z}{b}\right) \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \end{aligned} \right] + \\
 &+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}(t) \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \end{aligned} \right]; \\
 A_{ijk}^*(t) &= \frac{4}{h \cdot L} \int_0^h \int_0^L \left[ \begin{aligned} &T_v(y, x, t) - \\ &-T_w(t) \end{aligned} \right] \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot dy \cdot dx; \\
 A_{ijk} &= \int_0^t e^{-k_1 \cdot (t-\tau)} \cdot F_0(\tau) \cdot d\tau + C_{ijk}^* \cdot e^{-k_1 \cdot t}; \\
 F_0(t) &= 2 \cdot \left[ k_3 \cdot A_{jk}^*(t) + k_4 \cdot \frac{dA_{jk}^*(t)}{dt} \right]; \\
 C_{ijk}^* &= -\frac{2}{i \cdot \pi} \cdot \left[ 1 - \left(1 - \frac{b}{L}\right) \cdot \cos(i \cdot \pi) \right] \cdot A_{jk}^*(0); \\
 k_1 &= a \cdot \left[ \left(\frac{i \cdot \pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{L}\right)^2 \right]; \quad k_2 = \frac{64}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k}; \\
 k_3 &= \frac{\pi \cdot a}{i} \cdot \left( \frac{j^2}{h^2} + \frac{k^2}{L^2} \right) \cdot \left[ \left(1 - \frac{b}{L}\right) \cdot \cos(i \cdot \pi) - 1 \right]; \\
 k_4 &= \frac{1}{i \cdot \pi} \cdot \left[ \left(1 - \frac{b}{L}\right) \cdot \cos(i \cdot \pi) - 1 \right]; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
 i &= 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad j = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad k = 1, 3, 5, \dots, \infty.
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

де,  $T(x, y, z, t)$ - температура колони в розрахунковій точці з координатами  $(x, y, z)$  в момент часу  $t$ ;  $T_v(y, x, t)$ ; - те ж, в області нагріву;  $T_w(t)$ ; - те ж на протилежній частині колони  $T_0(x, y, z), T_w(0)$ ; - те ж, в початковий момент часу.

2.4. Дозволяється розглядати спрощену схему нагріву колони (одновимірний випадок).

2.4.1. Якщо нагрівання здійснюється в напрямку осі  $OZ$ , то слід використовувати систему рівнянь (4.13):

$$\left. \begin{aligned} T(z, t) &= T_0 + a_{1,x} + b_{1,x} \cdot x + \sum_{i=1}^{\infty} C_{i,x}(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot z}{b}\right); \\ C_i(t) &= C_{0,i,z} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{b^2}}; \quad a_{1,z} = T_{v,z}; \quad b_{1,z} = \frac{T_{v,z} - T_{w,z}}{b}; \\ C_{0,i,z} &= \frac{2 \cdot \{a_{1,z} \cdot [-1 + \cos(i \cdot \pi)] + b \cdot b_{1,z} \cdot \cos(i \cdot \pi)\}}{i \cdot \pi}; \\ a &= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

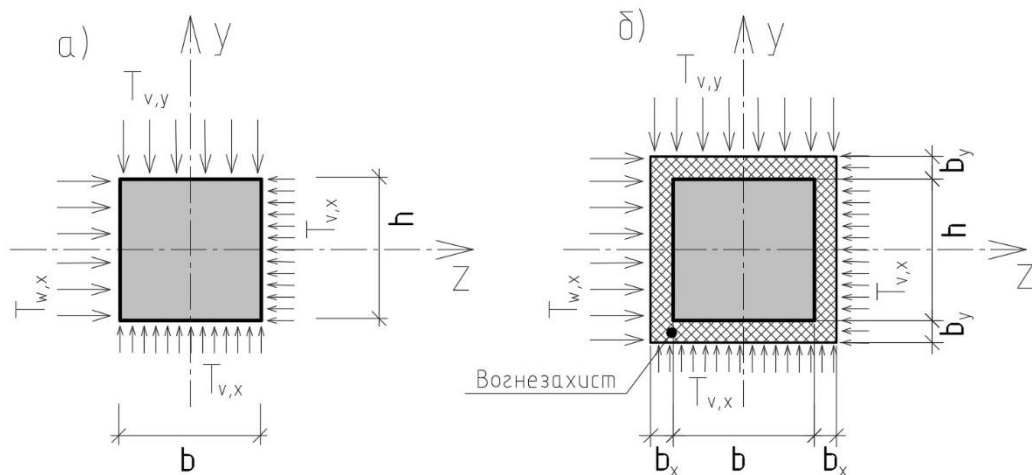


Рис. 4.25. Розрахункова схема температурного поля в колоні.

а) колона без вогнезахисту; б) колона з вогнезахистом.

*Примітки:*

1. Цей рисунок слід розглядати разом з рис. 4.24.
2. Сірим кольором виділена дерев'яна колона, а білим - вогнезахист.
3. Товщина теплоізоляції в напрямку координатних осей прийнята рівною  $dx$ .

2.4.2. Якщо нагрівання здійснюється в напрямку осі  $OY$ , то слід використовувати систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} T(y, t) &= T_0 + a_{1,y} + b_{1,y} \cdot x + \sum_{i=1}^{\infty} C_{i,y}(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot y}{h}\right); \\ C_i(t) &= C_{0,i,y} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{h^2}}; \quad a_{1,y} = T_{v,y}; \quad b_{1,y} = \frac{T_{v,y} - T_{w,y}}{b}; \\ C_{0,i,y} &= \frac{2 \cdot \{a_{1,y} \cdot [-1 + \cos(i \cdot \pi)] + h \cdot b_{1,y} \cdot \cos(i \cdot \pi)\}}{i \cdot \pi}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

2.4.3. Якщо нагрівання здійснюється в напрямку осей 0Z і 0Y одночасно, то слід використовувати рівняння (4.15):

$$T(z, y, t) = T(z, t) + T(y, t). \quad (4.15)$$

3.3. Якщо в області нагрівання є вогнезахист, слід розглядати спрощену схему нагріву колони, зображену на рис. 4.16, б.

3.3.1. Якщо нагрівання здійснюється в напрямку осі 0Z, то для визначення температури слід використовувати системи рівнянь:

3.3.1.1. Для стаціонарного теплового впливу:

$$\left. \begin{aligned} T(z) &= \begin{cases} a_1 + b_1 \cdot x & \text{при } z \in (0, d); \\ a_2 + b_2 \cdot (x - d) & \text{при } z \in (d, b + d); \\ a_3 + b_3 \cdot (x - d - b) & \text{при } x \in (b + d, b + 2 \cdot d); \end{cases} \\ a_1 &= T_v; \quad a_2 = \frac{(2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_2) \cdot T_v + \lambda_2 \cdot d \cdot T_w}{zn}; \\ a_3 &= \frac{(2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_2) \cdot T_w + \lambda_2 \cdot d \cdot T_v}{zn}; \quad b_1 = -\frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{zn}; \\ b_2 &= -\frac{\lambda_1 \cdot (T_v - T_w)}{zn}; \quad b_3 = -\frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{zn}; \quad zn = 2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1 \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

4.3.1.2. Для нестационарного теплового впливу:

$$\left. \begin{aligned}
& \text{При } z \in (0, d) \\
& T(z, t) = T_0 + a_1 + b_1 \cdot x + \sum_{i=1}^{\infty} C_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot z}{2 \cdot d}\right); \\
& C_i(t) = C_{0,i} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{4 \cdot d^2}}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
& C_{0,i,z} = \left[ \frac{2}{i \cdot \pi} (1 - \cos(i \cdot \pi)) - \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot a_1 + \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \cdot d \cdot b_1; \\
& \text{При } z \in (d, b + d) \\
& T(z, t) = T_0 + a_2 + b_2 \cdot x + \sum_{i=1}^{\infty} C_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot (x - d)}{3 \cdot b}\right); \\
& C_i(t) = C_{0,i} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{9 \cdot b^2}}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
& C_{0,i} = \left[ \frac{2}{i \cdot \pi} (1 - \cos(i \cdot \pi)) - \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot a_2 + \\
& \quad + \left[ \frac{12 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot i \cdot \pi}{3}\right)}{(i \cdot \pi)^2} - \frac{12 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{3}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot b \cdot b_3; \\
& \text{При } z \in (b + d, b + 2 \cdot d) \\
& T(z, t) = T_0 + a_3 + b_3 \cdot x + \sum_{i=1}^{\infty} C_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot (x - d - b)}{2 \cdot d}\right); \\
& C_i(t) = C_{0,i} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{4 \cdot d^2}}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
& C_{0,i} = \left[ \frac{2}{i \cdot \pi} (1 - \cos(i \cdot \pi)) - \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot a_3 + \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \cdot d \cdot b_3;
\end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

3.3.2. Якщо нагрівання здійснюється в напрямку осі  $OY$ , то для визначення температури слід використовувати системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned}
& \text{3.3.2.1. Для стаціонарного теплового впливу:} \\
& T(y) = \left\{ \begin{aligned}
& a_1 + b_1 \cdot y \quad \text{при } y \in (0, d); \\
& a_2 + b_2 \cdot (y - d) \quad \text{при } x \in (d, h + d); \\
& a_3 + b_3 \cdot (y - d - h) \quad \text{при } x \in (h + d, h + 2 \cdot d); \\
& a_1 = Tv; \quad a_2 = \frac{(2 \cdot \lambda_2 \cdot d + h \cdot \lambda_2) \cdot Tv + \lambda_2 \cdot d \cdot Tw}{zn}; \\
& a_3 = \frac{(2 \cdot \lambda_2 \cdot d + h \cdot \lambda_2) \cdot Tw + \lambda_2 \cdot d \cdot Tv}{zn}; \quad b_1 = -\frac{\lambda_2 \cdot (Tv - Tw)}{zn}; \\
& b_2 = -\frac{\lambda_1 \cdot (Tv - Tw)}{zn}; \quad b_3 = -\frac{\lambda_2 \cdot (Tv - Tw)}{zn}; \quad zn = 2 \cdot \lambda_2 \cdot d + h \cdot \lambda_1
\end{aligned} \right\} \quad (4.18)
\end{aligned} \right.$$

3.3.2.2. Для нестационарного теплового впливу:

$$\left. \begin{aligned}
& \text{Прu } y \in (0, d) \\
& T(y, t) = T_0 + a_1 + b_1 \cdot y + \sum_{i=1}^{\infty} C_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot y}{2 \cdot d}\right); \\
& C_i(t) = C_{0,i} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{4 \cdot d^2}}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
& C_{0,i} = \left[ \frac{2}{i \cdot \pi} (1 - \cos(i \cdot \pi)) - \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot a_1 + \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \cdot d \cdot b_1; \\
& \text{Прu } y \in (d, h + d) \\
& T(y, t) = T_0 + a_2 + b_2 \cdot y + \sum_{i=1}^{\infty} C_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot (y-d)}{3 \cdot h}\right); \\
& C_i(t) = C_0 \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{9 \cdot b^2}}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
& C_{0,i} = \left[ \frac{2}{i \cdot \pi} (1 - \cos(i \cdot \pi)) - \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot a_2 + \\
& \quad + \left[ \frac{12 \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot i \cdot \pi}{3}\right)}{(i \cdot \pi)^2} - \frac{12 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{3}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot h \cdot b_2; \\
& \text{Прu } y \in (h + d, h + 2 \cdot d) \\
& T(y, t) = T_0 + a_3 + b_3 \cdot y + \sum_{i=1}^{\infty} C_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot (x-d-h)}{2 \cdot d}\right); \\
& C_i(t) = C_{0,i} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{4 \cdot d^2}}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
& \text{Прu } y \in (h + d, h + 2 \cdot d) \\
& T(y, t) = T_0 + a_3 + b_3 \cdot y + \sum_{i=1}^{\infty} C_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot (x-d-h)}{2 \cdot d}\right); \\
& C_i(t) = C_{0,i} \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot t}{4 \cdot d^2}}; \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}; \\
& C_{0,i} = \left[ \frac{2}{i \cdot \pi} (1 - \cos(i \cdot \pi)) - \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \right] \cdot a_3 + \frac{8 \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right)}{(i \cdot \pi)^2} \cdot d \cdot b_3;
\end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

3.2.3. Якщо нагрівання здійснюється в напрямку осей  $0X$  і  $0Y$  одночасно, то слід використовувати формулу (4.15).

4. При проектуванні вогнезахисту для запобігання термодеструкції деревини слід домогтися на весь час високотемпературного впливу виконання умов:

$$\left. \begin{aligned}
& T_{d,p} \leq k_p \cdot T_v; \\
& T_{d,p} \leq k_p \cdot T_w; \\
& T_{d,m}(z, y) \leq k_m \cdot T(z, y);
\end{aligned} \right\}, \quad (4.20)$$

де:  $T_{d,p}$ - температура термодеструкції вогнезахисту;  $T_v, T_w$ ; - температура на поверхні вогнезахисту;  $k_p$ - коефіцієнт безпеки при нагріванні матеріалу вогнезахисту;  $T_{d,m}$ - температура термодеструкції матеріалу колони в

розрахунковій точці з координатами  $(z, y)$ ;  $T(z, y)$ - температура матеріалу колони в розрахунковій точці поперечного перерізу конструкції (її слід розраховувати з використанням формул (4.15), (4.16) і (4.18));  $k_m$ - коефіцієнт безпеки матеріалу конструкції (клеєної деревини) при нагріванні.

5. Для визначення часу початку руйнування конструкції з вогнезахистом слід використовувати наступні формули:

$$\left. \begin{array}{l} \text{При нагіві у напрямку осі } OZ: \\ t_{nd} = -k_m \cdot k_r \cdot \frac{4 \cdot d^2 \cdot \rho_p \cdot c_{p,p}}{\pi^2 \cdot \lambda_p} \ln \left[ \frac{T_{d,m}}{Tv - \frac{\lambda_m \cdot (Tv - Tw) \cdot d}{2 \cdot \lambda_m \cdot d + b \cdot \lambda_p}} \right]; \\ \text{При нагіві у напрямку осі } OY: \\ t_{nd} = -k_m \cdot k_r \cdot \frac{4 \cdot d^2 \cdot \rho_p \cdot c_{p,p}}{\pi^2 \cdot \lambda_p} \ln \left[ \frac{T_{d,m}}{Tv - \frac{\lambda_m \cdot (Tv - Tw) \cdot d}{2 \cdot \lambda_m \cdot d + h \cdot \lambda_p}} \right]; \end{array} \right\} \quad (4.21)$$

$k_m, Tv, Tw, d, b, h$  - див.п.4.2.

Пояснення до формули (4.20);  $k_r$ - коефіцієнт умов роботи (залежить від теплофізичних властивостей вогнезахисту, в тому числі вологості, фазових переходів, випаровування зв'язаної води і т.д.);  $\rho_p, c_{p,p}, \lambda_p$ - відповідно щільність, питома теплоємність і коефіцієнт теплопередачі матеріалу теплозахисту;  $\lambda_m$  - те ж для матеріалу колони.

6. При розрахунку напружено-деформованого стану дерев'яної колони слід використовувати об'ємні кінцеві елементи.

6.1. Для опису пружних властивостей деревини слід використовувати модуль пружності (формула (4.11)) і коефіцієнт Пуассона (його слід приймати рівним 0,3).

6.1.1. Для визначення залежності модуля загальної деформації від температури слід використовувати формули (4.3).

6.2. Коефіцієнт лінійного температурного розширення деревини слід приймати рівним  $5 \div 7 \cdot 10^{-6}$ .

Для цієї мети дозволяється використовувати рівняння (4.12) - 4.15).

6.3. Температурні поля конструкції з урахуванням теплозахисту слід розраховувати з використанням рівнянь (4.16) - (4.19).

6.4. Для обчислення величини термодеструкції дерев'яної колони слід видаляти з розрахункової схеми відповідні кінцеві елементи або приймати їх модуль деформації, що дорівнює нулю (цей параметр залежить від програмного комплексу, який використовується для розрахунку).

6.5. У таблицю поєднань навантажень при розрахунку напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій, які знаходяться під впливом високих температур, обов'язково слід додати такі особливі сполучення:

6.5.1. Вплив зміни деформаційних властивостей деревини за рахунок локального нагрівання матеріалу конструкції (в цьому випадку коефіцієнт поєднання слід приймати рівним 1,1).

6.5.2. Врахування зміни вигорання матеріалу (в цьому випадку коефіцієнт поєднання слід приймати рівним 1,4).

6.6. Для визначення властивостей матеріалу колони в межах кожного з граничних елементів слід використовувати формули (4.4), (4.5), (4.69), (4.7), (4.8) і (4.9).

Описана у цьому розділі методика розрахунку дерев'яних конструкцій, які перебувають під впливом високотемпературного нагріву, дозволяє враховувати вплив на їх напружено-деформований стан таких чинників:

- силові впливи на колону;
- зменшення модуля пружності деревини при зростанні температури нагрівання колони;
- вплив на температурні поля в колоні (а отже, і на її напружено-деформований стан) теплозахисту;
- температурні деформації деревини.
- ослаблення перерізу колони в результаті вигорання її матеріалу;

Крім того, викладені в цьому розділі матеріали досліджень дозволяють розрахувати час початку термодеструкції деревини колони.

#### 4.7. ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 4.

Загалом, викладені в четвертому розділі матеріали досліджень дозволили зробити такі висновки:

1. Запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану дерев'яних конструкцій яка дозволяє отримати більш точні результати, ніж методика ДБН і тому може бути використана для вирішення практичних завдань проектування дерев'яних будівельних конструкцій.

2. Запропонована методика визначення часу початку горіння теплоізольованих конструкцій дозволяє обґрунтовано вибирати матеріал теплозахисту і визначати товщину теплової ізоляції розрахунковим шляхом.

3. Отримано аналітичний розв'язок температурної задачі для розрахунку дерев'яної колони, на яку діє високотемпературний вплив.

Також має місце узагальнення даного рішення на випадок нагрівання колони температурою з боку інших площин. Це досягається циклічною перестановкою змінних  $x$ ,  $y$ ,  $z$  і параметрів «0», «b» і «L».

4. Отримано аналітичний розв'язок задачі про зміну характеристик міцності деревини при стиску та розтягу в перерізах нерівномірно нагрітої дерев'яної колони.

5. Отримано аналітичний розв'язок задачі про розподіл модуля пружності при стиску і розтягу деревини.

6. Отримано рівняння необхідні для усереднення розрахункових характеристик деревини (вони потрібні для вирішення завдань з використанням методу скінченних елементів).

7. Викладена методика дозволяє розрахувати час початку горіння матеріалу колони захищеної вогнезахисним покриттям.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику вогневих досліджень, яка дала можливість дослідити напружено-деформований стан в зоні горіння стиснутих дощатоклеєних колон при локальній дії високої температури;

2. Отримано експериментальні результати зміни напружено-деформованого стану стиснутих колон при локальній дії високих температур та зовнішнього навантаження і встановлені закономірності їх руйнування .

3. Визначена ефективність застосування вогнезахисту дощатоклеєних конструкцій вогнезахисними гіпсокартонними листами при дії високої температури, та встановлено:

за результатами лабораторних досліджень захист одним шаром гіпсокартону збільшує вогнестійкість конструкції більше ніж на 30хв.

за результатами натурного експерименту із застосуванням вогнезахисту гіпсокартонними листами було встановлено, що руйнування вогнезахисту відбувається від вигорання деревини в місцях кріплення саморізів, тому рекомендовано при виконанні такого вогнезахисту додаткове приклеювання шарів гіпсокартону вогнетривкими клеями та використання скловолокнистої сітки поверх гіпсокартонних листів

4. За результатами натурного експерименту була визначена швидкість горіння деревини в умовах реальної пожежі від 0,5 до 0,9 мм/хв, що відповідає запропонованій величині згідно ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157-2010

5. Виконано порівняння експериментальних несучих здатностей колон з теоретичними згідно методик ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157-2010 і встановлено наступне :

розрахунок за методом приведеного поперечного перерізу завищує результат в 1,15 рази в порівнянні з експериментом, ,тому рекомендовано збільшити величину товщини шару з нульовими показниками міцності та жорсткості  $d_0$  до 8 мм, ;

розрахунок за приведеними характеристиками перерізу завищує результат в 1,13 рази в порівнянні з експериментом, тому рекомендовано змінити формулу розрахунку коефіцієнту  $k_{\text{mod},fi} = 1,0 - \frac{1}{105} \frac{p}{A_r}$ .

6. Розроблено математичний метод розв'язку температурної та силової задачі при локальному впливі високої температури на дерев'яні колони методом кінцевих елементів.

7. Розроблено рекомендації з проектування та розрахунку несучої здатності стиснутих дощатоклеєних колон в умовах дії зовнішнього навантаження та локальному високотемпературному впливі які використані в реальному проектуванні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Будівельний матеріал, який люблять німці | Музика й кіно, література й мистецтво з Німеччини | DW | 27.05.2021. .
2. Koppitz J.-P., la Peña J. de, Schmid V. Metropol Parasol – Adventures in Engineering. 2014. С. 2303–2310.
3. Schubert D. The great fire of Hamburg, 1842: From catastrophe to reform. 2012. С. 212–234.
4. 3 червня 1527 р. — Львівська міська рада. .
5. Heyman J. The Fire at Notre-Dame: Roof. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*. 2019. Вип. 2, № 5.
6. ДБН В. 1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Київ:Держбуд України, 2003.
7. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ:Мінрегіонбуд України, 2017.
8. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157:2010 Конструкції будинків і споруд. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, MOD). Київ:Мінрегіонбуд України, 2010.
9. Шналь Т. Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: Навч. Посібник. Львів:Видавництво Національного університету “Львівська політехніка, 2006. 220 с.
10. Справочник по древесиноведению, лесоматериалам и деревянным конструкциям : [пер. с англ.]. Кн. 2. Москва:Гослесбумиздат, 1959. 359 с.
11. ДБН В.2.6-161:2017 Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ:Мінрегіонбуд України, 2017.
12. EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures. - Part 1-2: General - Structural fire design. .
13. Schaffer E. L. Charring rate of selected woods - transverse to grain.

Forest Products Lab Madison Wis, 1967.

14. Schaffer E. L. Structural fire design: Wood. Forest Products Laboratory, 1984.

15. Ясній П. В., Гомон С. С. Експериментальні дослідження суцільної деревини конструкційних розмірів з врахуванням фактора вологості. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. № 1: 49-56.* 2020.

16. Ясній П. В., Гомон С. С. Дослідження січних модулів листяних та хвойних порід деревини з різним показником вологості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 4: 125-130.* 2020.

17. DIN 4102-3/1977-09 randverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Brandwände und nichttragende Außenwände, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. .

18. Лямзина П. В. Влияние влажности на коэффициент теплопроводности древесины при низких отрицательных температурах. 2017.

19. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины. *Пожаровзрывобезопасность.* 2012. Вып. 21, № 1.

20. White R. H. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood and fiber science.* 1987. Вып. 19, № 4. С. 446–452.

21. Kúdela J., Slaninka R. Stability of wood columns loaded in buckling. Part 2. Eccentric buckling. *Drevarsky Vyskum/Wood Research.* 2004. Вып. 49. С. 13–23.

22. Escalantea M., Rougier V., Rosales M. B. Buckling of wood columns with uncertain properties. *Mecánica Computacional Vol XXXI,* 2012.

23. Клименко В. З. Развитие методик расчета сжато-изогнутых элементов в историческом аспекте. *Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені ВМ Шимановського.* 2010. № 5. С. 130–139.

24. Клименко В. З. Расчет деревянных конструкций по деформациям

и на прочность по деформированной схеме. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2012. № 6. С. 69–73.

25. Клименко В. З., Михайловский Д. В., Коваленко М. С. Поиск истины в модулях упругости древесины  $E$  и  $E'$  при расчете сжатоизгибаемых элементов. *Современные строительные конструкции из металла и древесины*. 2012. № 16 (1). С. 115–123.

26. Кліменко В. З. Еволюційний характер сучасної концепції проектування конструкцій з клеєної деревини. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені ВМ Шимановського*. 2011. № 8. С. 5–14.

27. Клименко В. З., Коваленко М. С., Коваль А. В. Рассуждения о методике расчета деревянных внецентренносжато-изгибаемых элементов. 2010.

28. Naksever A., Savaş S. Design of wood columns under real fire action. 2005. Вып. 16. С. 3713–3738.

29. Гомон С. С., Павлюк А. П. Работа балок из цельной и клееной древесины при косом изгибе. 2017.

30. Найчук А. Я. Прочность элементов деревянных конструкций в условиях сложного неоднородного напряженного состояния. .

31. Найчук А. Я., Серов Е. Н., Захаркевич И. Ф. Некоторые особенности расчета клееных деревянных конструкций. *Строительный эксперт*. 2009. С. 212–218.

32. Орлович Р. Б., Найчук А. Я. О применении критериев длительной прочности в расчетах деревянных конструкций. *Изв. вузов. Строительство и архитектура*. 1986. № 5-С. С. 15–19.

33. Найчук А. Я., Орлович Р. Б. Оценка прочности древесины методами механики разрушения. *Совершенствование строительных конструкций из дерева и пластмасс. Межвуз. темат. сб. трудов/АЯ Найчук,*

РБ Орлович.–СПб.: СПБИСИ. 1992. С. 43–48.

34. Гомон С. С. Визначення критичних деформацій різних порід деревини вирощених на території України та за її межами. *Sciences of Europe*. 2020. Вип. 1, № 54. С. 36–41.

35. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT). .

36. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT). Зміна № 1. .

37. König J. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2 A design model for standard fire exposure. 2000.

38. Lau P. W. C., White R., Zealand I. Van. Modelling the charring behaviour of structural lumber. *Fire and materials*. 1999. Вип. 23, № 5. С. 209–216.

39. Tran H. C., White R. H. Burning rate of solid wood measured in a heat release rate calorimeter. *Fire and materials*. 1992. Вип. 16, № 4. С. 197–206.

40. White R. H., Tran H. C. Charring rate of wood exposed to a constant heat flux. 1996.

41. Шналь Т. Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: Навчальний посібник. Львів:Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2006. 220 с. ISBN 966-553-528-5.

42. Brandon D., Svensson M., Bexander V., Pettersson H., Björkdahl C., Sandell E. C., Försäkring S., Helsing J., Storgöteborg R., Nystedt F., Brodell A., Räddningstjänst V., Moln-Teike J., Räddningstjänst K., Cronsioe C. B., Sjelvgren A., Johansson H.-E., Rudenstam B. S. Engineering methods for structural fire design of wood buildings-structural integrity during a full natural fire BRANDFORSK 2018:2 PROJECT TECHNICAL PANEL. 2018. 40 с. ISBN 978-91-88695-83-3.

43. ISO - ISO 834-2:2019 - Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 2: Requirements and recommendations for measuring furnace exposure on test samples. .
44. Brandon D., Just A., Andersson P., Östman B. Mitigation of fire damages in multi-storey timber buildings: Statistical analysis and guidelines for design. 2018.
45. Lange D., Boström L., Schmid J., Albrektsson J. The Reduced Cross Section Method Applied to Glulam Timber Exposed to Non-standard Fire Curves. *Fire Technology* 2015 51:6. 2015. Вип. 51, № 6. С. 1311–1340.
46. Buchanan A. H., Abu A. Structural design for fire safety. С. 415.
47. Östman B., Brandon D., Frantzich H. Fire safety engineering in timber buildings. *Fire Safety Journal*. 2017. Вип. 91. С. 11–20.
48. Frangi A., Bochicchio G., Ceccotti A., Lauriola M. Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building. 2008.
49. Данкевич І. П., Шналь Т. М., Демчина Б. Г. Дослідження температурного режиму пожежі у модельному приміщенні. 2012.
50. Шналь Т. М., Прохоренко С. В., Данкевич І. П. Дослідження температурних режимів пожеж у житлових приміщеннях на моделях зменшеного масштабу. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва*. 2016. № 844. С. 232–236.
51. Була С. С., Шналь Т. М. Глибина обвуглення вогнезахищених стійок дерев'яних каркасних стін в умовах пожежі. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва*. 2019. № 912. С. 3–11.
52. Shnal T., Pozdieiev S., Sidnei S., Shvydenko A. Determination of the Charring Rate of Timber to Estimate the Fire Resistance of Structures at Real Temperature Modes of Fires. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Вип. 100 LNCE. С. 409–418.

53. Фещук Ю. Л., Поздеев С. В., Ніжник В. В. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. № 42. С. 155–164.

54. Поздеев С. В., Новгородченко А. Ю., Підгорецький Ю. Ю., Неділько І. А. Обґрунтування математичної моделі процесу обвуглювання зразків-фрагментів дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2019. Вип. 3, № 2. С. 90–97.

55. Фещук Ю. Л., Поздеев С. В., Нижник В. В., Новгородченко А. Ю. Метод интерполяции температурных полей в сечении фрагментов деревянных колонн с огнезащитной облицовкой. *ББК 68.69 (5Каз) Журнал «Вестник Кокшетауского технического института» № 3 (31), 2018 г., сентябрь. Издаётся с марта 2011 года. Собственник: Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям Министерства внутренних дел Республики Казахс.* 2018. Вип. 3, № 31. С. 64.

56. Feshchuk Y., Pozdieiev S., Zmaga Y., Novhorodchenko A. Estimation of Credibility of the Results of Measuring Temperature within Specimens of Wood Columns Obtained During Fire Tests. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Вип. 7, № 4.3. С. 284.

57. Демчина Б. Г. Вогнестійкість одно-і багат шарових просторових конструкцій житлових та громадських будівель. *Доктора техн. наук*. 2003. Вип. 5, № 01.

58. Данкевич І. П., Шналь Т. М., Демчина Б. Г. Дослідження температурного режиму пожежі у модельному приміщенні. 2012.

59. Фіцик В. С., Демчина Б. Г., Половко А. П. Вогневі випробування фрагментів стін за допомогою печі для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій та окремих вузлів їх стикових сполучень. 2007.



60. Демчина Б. Г. Розрахунок напружено-деформованого стану відсіків будівель при пожежах з врахуванням залежності властивостей матеріалі від температури. 2002.
61. Вареник К.А. Нелинейная ползучесть древесины. *Фундаментальные исследования (научный журнал)*. 2014. Вып. 9, № 8. С. 1653–1657.
62. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва:Наука, 1995. 576 с.
63. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. Москва:Мир, 1987. 542 с.
64. Love A. A treatise on the mathematical theory of elasticity. New York:Dover Publications, 1944. 643 с. ISBN 9780486601748.
65. Maugin G. A. Material inhomogeneities in elasticity. CRC Press, 2020. 276 с. ISBN 100011001X.
66. Sneddon I. N., Berry D. S. The Classical Theory of Elasticity. 1958.
67. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. Москва:Наука, 1988. 712 с.
68. Калугин А. В. Деревянные конструкции. Москва:АСВ, 2003. 223 с.
69. Слицкоухов Ю. В., Гуськов И. М., Ермоленко Л. К. Индустриальные деревянные конструкции. Примеры проектирования: Учеб. пособие для вузов. Москва:Стройиздат, 1991. 256 с.
70. Гринь И. М., Фурсов В. В., Бабушкин Д. М., Галушко П. Г., Гринь В. И. Проектирование и расчет деревянных конструкций: справочник. Київ:Будивэльник, 1988. 240 с.
71. Шмидт А. Б., Бабанов В. В., Гранкин К. В. К расчету непрямолинейных сжато-изгибаемых деревянных конструкций по деформированной схеме. *Вестник гражданских инженеров*. 2016. Вып. 3. С. 104–110.

72. Свенцицкий Г. В. Устойчивость внецентренно сжатых деревянных стержней. *Исследование прочности и устойчивости деревянных стержней: Сб. ЦНИПС*. 1940. С. 14–55.
73. Серов Е. Н. Рациональное использование анизотропии прочности материалов в клееных деревянных конструкциях массового изготовления: дис.... д-р техн. наук. 1988.
74. Порто Д. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 5: Проектирование деревянных конструкций. Москва:МГСУ, 2013. 308 с.
75. Клименко В. З. Феноменологический подход к расчету сжато-изгибаемых деревянных элементов. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2011. № 1. С. 7–11.
76. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. Москва:Наука, 1982. 304 с.
77. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. Москва, изд-во " Наука"; Главная редакция физико-математической литературы. Москва:Наука, 1977. 384 с.
78. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация: учебное пособие. Москва:Высшая школа, 1976. 277 с.
79. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. Москва:Стройиздат, 1968. 418 с.
80. Dascalu C., Maugin G. A. The thermoelastic material-momentum equation. *Journal of elasticity*. 1995. Вып. 39, № 3. С. 201–212.
81. Rafalski P. A variational principle for the coupled thermoelastic problem. *International Journal of Engineering Science*. 1968. Вып. 6, № 8. С. 465–471.
82. Sabatini L., Augusti G. Acceleration waves in thermoelastic beams. *Meccanica*. 2000. Вып. 35, № 6. С. 519–546.
83. THRUN Z. The method of subregions in coupled

thermoelasticity(Subregions method in coupled thermoelasticity, discussing numerical values for thin steel circular disk). *INGENIEUR-ARCHIV*. 1969. Вып. 37, № 6. С. 369–373.

84. Green A. E., Naghdi P. M. Thermoelasticity without energy dissipation. *Journal of elasticity*. 1993. Вып. 31, № 3. С. 189–208.

85. Kalpakides V. K., Maugin G. A. Canonical formulation and conservation laws of thermoelasticity without dissipation. *Reports on Mathematical Physics*. 2004. Вып. 53, № 3. С. 371–391.

86. Nickell R. E., Sackman J. L. Approximate solutions in linear, coupled thermoelasticity. 1968.

87. Pabst W. The linear theory of thermoelasticity from the viewpoint of rational thermomechanics. *Ceramics- Silikaty*. 2005. Вып. 49, № 4. С. 242–251.

88. Puri P., Jordan P. M. On the propagation of plane waves in type–III thermoelastic media. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2004. Вып. 460, № 2051. С. 3203–3221.

89. Radayev Y. N. Thermodynamical Model of Anisotropic Damage Growth. Part II. Canonical Damage Growth Rate Equations and Theory of Damage Invariants. 1996.

90. Rafalski P. Lagrangian formulation of dynamic thermoelastic problem(Variational Lagrange method for dynamic thermoelasticity problems in case of optimal thermal and mechanical boundary conditions). *ACADEMIE POLONAISE DES SCIENCES, BULLETIN, SERIE DES SCIENCES TECHNIQUES*. 1968. Вып. 16, № 1. С. 25–30.

91. Rafalski P. The Lagrangian formulation of the dynamic thermoelastic problem for mixed boundary conditions(Dynamic thermoelastic problem for mixed boundary conditions solved by Lagrangian differential equations, deriving heat conduction equation by variational pr. 1968.

92. Даугсте Ч. Л. Совместное применение температурно-временной и влажно-временной аналогий для построения обобщенных кривых. *Механика полимеров*. 1974. Вып. 3. С. 427–432.
93. Максимов Р. Д., Даугсте Ч. Л., Соколов Е. А. Особенности соблюдения температурно-временной аналогии при физически нелинейной ползучести полимерного материала. *Механика полимеров*. 1974. № 3. С. 413–426.
94. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Москва:Наука, 1974. 840 с.
95. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. Москва:Мир, 1986.
96. Кондратьева Л. Е. Основы метода конечных элементов. Введение. Расчет стержневых систем: конспект лекций. Владимир:Владимир гос. ун-та, 2007. 36 с.
97. ГОСТ 9620-94 Древина шарувата клеєна. Відбір зразків і загальні вимоги при випробуванні. .
98. ISO 13061-5:2020 - Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 5: Determination of strength in compression perpendicular to grain. .
99. ISO 13061-6:2014 - Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain. .
100. ISO 13061-3:2014 - Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 3: Determination of ultimate strength in static bending. .
101. JIS 1301 Fire resistance standart. Japan standart organization JIS.
102. Богословский В. Строительная теплофизика : Теплофиз. основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Учебник для вузов по

спец. «Теплогазоснабжение и вентиляция». Москва:Строительная теплотехника - Учебники и пособия, 1982. 415 с.

103. Бушев В. П., Пчелинцев В. А., Федоренко В. С., Яковлев А. И. Огнестойкость зданий. Москва:Издательство литературы по строительству, 1970. 265 с.

104. Беловешкин В. Т. Поведение железобетонных элементов при быстром одностороннем на-греве. *Жаростойкие и обычные бетоны при действии повышенных и высоких температур*. 1988. С. 58–67.

105. Зайцев А. М., Крикунов Г. И., Яковлев А. И. Расчет огнестойкости элементов строительных конструкций. Воронеж:ВГУ, 1982. 116 с.

106. Гроздов В. Т. Оценка напряженного состояния изгибаемых элементов по их прогину. *Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций. Материалы III научно-методической конференции ВИТУ*. 1999. С. 11–14.

107. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування (укр). Київ:Мінбуд України, 2006.

108. Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике. Москва:Мир, 1985. 590 с.

## ДОДАТОК А. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

Визначення температурного поля в даній задачі зводиться до вирішення диференціального рівняння в окремих похідних виду:

$$a \cdot \left. \begin{aligned} & \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t}; \\ & x \in (0, L); \quad y \in (0, h); \quad z \in (0, b). \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.1})$$

де,  $a_{red} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$  - приведений коефіцієнт теплопровідності;  $T$  - температура;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності деревини;  $\rho$  - щільність деревини;  $c_p$  - питома теплоємність деревини;  $t$  - час;  $b$  і  $h$  - розміри перерізу колони;  $L$  - довжина колони.

За початкову умову візьмемо:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (\text{A.2})$$

В якості граничних умов приймемо:

$$\left. \begin{aligned} T(x, 0, z, t) &= T_v(x, y, t); \\ T(x, h, z, t) &= T_w(t); \\ T(0, y, z, t) &= T_w(t); \\ T(L, y, z, t) &= T_w(t); \\ T(x, y, 0, t) &= T_w(t); \\ T(x, y, b, t) &= T_w(t). \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.3})$$

Вирішення завдання розіб'ємо на два етапи:

1. На першому етапі знайдемо вирішення задачі з наступними початковими і граничними умовами:

$$\left. \begin{aligned} T_1(x, y, z, 0) &= T_0(x, y, z); \\ T_1(0, y, z, t) &= T_w(t); \\ T_1(L, y, z, t) &= T_w(t); \\ T_1(x, 0, z, t) &= T_w(t); \\ T_1(x, h, z, t) &= T_w(t); \\ T_1(x, y, 0, t) &= T_w(t); \\ T_1(x, y, b, t) &= T_w(t). \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.4})$$

2. На другому етапі розглянемо початкові і граничні умови:

$$\left. \begin{aligned} T_2(x, y, z, 0) &= 0; \\ T_2(x, y, 0, t) &= T_v(x, y, t) - T_w(t); \\ T_2(x, y, b, t) &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.5})$$

$$\left. \begin{aligned} T_2(x, 0, z, t) &= 0; \\ T_2(x, h, z, t) &= 0; \\ T_2(x, y, 0, t) &= 0; \\ T_2(x, y, b, t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.5})$$

3. Загальне вирішення задачі знайдемо як суму температур  $T_1$  і  $T_2$ :

$$T(x, y, z, t) = T_1(x, y, z, t) + T_2(x, y, z, t) \quad (\text{A.6})$$

Рішення (A.6) задовольняє рівняння (A.1), початкову умову (A.2) і граничні умови (A.3).

I. Перший етап розв'язку задачі.

Необхідно розв'язати рівняння з такими початковими і граничними умовами (A.4):

$$a \cdot \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T_1}{\partial t}; \quad x \in (0, :L); \quad y \in (0, h); \quad z \in (0, b). \quad \} \quad (\text{A.7})$$

Розв'язок шукаємо у вигляді:

$$T_1(x, y, z, t) = T_w(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}^1(t) \cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{bmatrix}. \quad (\text{A.8})$$

Підставивши (A.8) в (A.7), знайдемо:

$$\frac{dT_w(t)}{dt} + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{dA_{ijk}^1}{dt} + a \cdot \begin{bmatrix} \left(\frac{i \cdot \pi}{L}\right)^2 + \\ + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \\ + \left(\frac{k \cdot \pi}{b}\right)^2 \end{bmatrix} \cdot A_{ijk}^1 \right\} \cdot \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Далі помножимо (A.9) на функцію  $\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right)$  і проінтегруємо отриману таким чином рівність в інтервалах  $x \in (0, L)$ ;  $y \in (0, h)$ ;  $z \in (0, b)$ . Отримаємо:

$$\left. \frac{8}{(\pi \cdot i \cdot j \cdot k)^3} \cdot \frac{dT_w(t)}{dt} + \frac{dA_{ijk}^1}{dt} + a \cdot \left[ \begin{array}{l} \left(\frac{i \cdot \pi}{L}\right)^2 + \\ + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \\ + \left(\frac{k \cdot \pi}{b}\right)^2 \end{array} \right] \cdot A_{ijk}^1 \right\} \quad (\text{A.10})$$

$$i = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad j = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad k = 1, 3, 5, \dots, \infty.$$

Розв'язання (A.10) має вигляд:

$$\left. \begin{array}{l} A_{ijk}^1(t) = -k_2 \cdot \int_0^t \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot e^{-k_1 \cdot (t-\tau)} + C_{ijk} \cdot e^{-k_1 \cdot t}; \\ k_1 = \left(\frac{i \cdot \pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{b}\right)^2; \quad k_2 = \frac{8}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k}; \\ i = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad j = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad k = 1, 3, 5, \dots, \infty. \end{array} \right\} \quad (\text{A.11})$$

Верхнє рівняння (A.11) містить невідому постійну  $C_{ijk}$ . Цю постійну знайдемо з початкової умови (A.4). Для цього підставимо в (A.11) час  $t$  і отриману таким чином функцію в (A.9). Маємо:

$$T_1(x, y, z, 0) = T_w(0) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} C_{ijk} \cdot \left[ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{array} \right] = T_0(x, y, z). \quad (\text{A.12})$$

Далі множимо (A.12) на функцію  $\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right)$  і проінтегруємо отримане таким чином рівняння на інтервалах  $x \in (0, L)$ ;  $y \in (0, h)$ ;  $z \in (0, b)$ :

$$C_{ijk} = \frac{8}{L \cdot h \cdot b} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} [T_0(x, y, z) - T_w] \cdot \left[ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{array} \right] \cdot dx \cdot dy \cdot dz. \quad (\text{A.13})$$

Якщо температура колони в початковий момент часу не залежить від координат (тобто  $T_0(x, y, z) = T_0 = const$ ), то коефіцієнт  $C_{ijk}$  дорівнює:



$$C_{ijk} = 64 \cdot \frac{T_0 - T_w}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k} \quad (\text{A.14})$$

Враховуючи (A.8), (A.11) і (A.13) температура  $T_1$  дорівнює:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_w(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}^1(t) \cdot \left[ \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \right]; \\ A_{ijk}^1(t) &= -k_2 \cdot \int_0^t \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot e^{-k_1 \cdot (t-\tau)} + C_{ijk} \cdot e^{-k_1 \cdot t}; \\ k_1 &= a \cdot \left[ \left(\frac{i \cdot \pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{b}\right)^2 \right]; \quad k_2 = \frac{8}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k}; \end{aligned} \right\} (\text{A.15})$$

$$C_{ijk} = \frac{8}{L \cdot h \cdot b} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} [T_0(x, y, z) - T_w] \cdot \left[ \begin{array}{l} \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{array} \right] \cdot dx \cdot dy \cdot dz; \quad \left. \begin{array}{l} i = 1, 3, 5, \dots, \infty; \\ j = 1, 3, 5, \dots, \infty; \\ k = 1, 3, 5, \dots, \infty. \end{array} \right\} (\text{A.16})$$

II. Другий етап розв'язку.

Необхідно розв'язати рівняння з початковими і граничними умовами (A.5):

$$\left. \begin{array}{l} a \cdot \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T_2}{\partial t}; \\ x \in (0, L); \quad y \in (0, h); \quad z \in (0, b). \end{array} \right\} (\text{A.17})$$

Розв'язок знаходимо у вигляді:

$$\begin{aligned} T_2(x, y, z, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_{jk}^*(t) \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) \cdot \left[ \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \right] + \\ &\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}(t) \cdot \left[ \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \right], \quad (\text{A.18}) \end{aligned}$$

де:

$$A_{jk}^*(t) = \int_0^h \int_0^L [T_v(y, x, t) - T_w(t)] \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot dy \cdot dx, \quad (\text{A.19})$$

Функція  $A_{ijk}(t)$  буде визначена під час розв'язування задачі (A.17) і задовольнятиме початкові умови (верхнє рівняння (A.5)).

Вираз (A.18) задовольняє граничні умови (A.5). Для знаходження розв'язку підставимо (A.18) в (A.19). Отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_{ijk}}{dt} + k_1 \cdot A_{ijk} + \frac{2}{i \cdot \pi} \cdot \left( \frac{dA_{jk}^*}{dt} + k_3 \cdot A_{jk}^* \right) &= 0; \\ k_3 &= a \cdot \left[ \left( \frac{j \cdot \pi}{h} \right)^2 + \left( \frac{k \cdot \pi}{b} \right)^2 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.20})$$

Тут  $k_1$  - див. (A.15).

Розв'язок (A.20) має вигляд:

$$A_{ijk} = -\frac{2}{i \cdot \pi} \cdot \int_0^t e^{-k_1 \cdot (t-\tau)} \cdot \left[ \frac{dA_{jk}^*(\tau)}{d\tau} + k_3 \cdot A_{jk}^*(\tau) \right] \cdot d\tau. \quad (\text{A.21})$$

З урахуванням (A.6), (A.15), (A.16), (A.18), (A.19) і (A.21) знайдемо остаточний розв'язок задачі:

$$\left. \begin{aligned} T(x, y, z, t) &= T_1(x, y, z, t) + T_2(x, y, z, t); \\ T_1 &= T_w(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}^1(t) \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ &\cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ &\cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{aligned} \right]; \\ A_{ijk}^1(t) &= -k_2 \cdot \int_0^t \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \cdot e^{-k_1 \cdot (t-\tau)} + C_{ijk} \cdot e^{-k_1 \cdot t}; \\ C_{ijk} &= \frac{8}{b \cdot h \cdot L} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} &T_0(x, y, z) - \\ &-T_w(0) \end{aligned} \right] \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \\ &\cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \\ &\cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{aligned} \right] \cdot dx \cdot dy \cdot dz; \\ T_2(x, y, z, t) &= \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} A_{jk}^*(t) \cdot \left(1 - \frac{z}{b}\right) \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \end{aligned} \right] + \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}(t) \cdot \left[ \begin{aligned} &\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \end{aligned} \right]; \\ A_{jk}^*(t) &= \frac{4}{h \cdot L} \int_0^h \int_0^L \left[ \begin{aligned} &T_v(y, x, t) - \\ &-T_w(t) \end{aligned} \right] \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot dy \cdot dx; \\ A_{ijk} &= \int_0^t e^{-k_1 \cdot (t-\tau)} \cdot F_0(\tau) \cdot d\tau + C_{ijk}^* \cdot e^{-k_1 \cdot t} \\ F_0(t) &= 2 \cdot \left[ k_3 \cdot A_{jk}^*(t) + k_4 \cdot \frac{dA_{jk}^*(t)}{dt} \right]; \\ C_{ijk}^* &= -\frac{2}{i \cdot \pi} \cdot \left[ 1 - \left(1 - \frac{L}{b}\right) \cdot \cos(i \cdot \pi) \right] \cdot A_{jk}^*(0); \\ k_1 &= a_{red} \cdot \left[ \left(\frac{i \cdot \pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{b}\right)^2 \right]; \quad k_2 = \frac{64}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k}; \\ k_3 &= \frac{\pi \cdot a_{red}}{i} \cdot \left( \frac{j^2}{h^2} + \frac{k^2}{b^2} \right) \cdot \left[ \left(1 - \frac{L}{b}\right) \cdot \cos(i \cdot \pi) - 1 \right]; \\ k_4 &= \frac{1}{i \cdot \pi} \cdot \left[ \left(1 - \frac{L}{b}\right) \cdot \cos(i \cdot \pi) - 1 \right]; \\ i &= 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad j = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad k = 1, 3, 5, \dots, \infty. \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.22})$$

Формули (А.22) в поєднанні з принципом суперпозиції дозволяють визначити температурні поля практично для всіх умов нагріву будівельних конструкцій. При цьому вони мають надто складний вигляд.

Тому розглянемо більш прості умови нагрівання. Підставимо в (А.22):

$$T_0(x, y, z) = T_0 = \text{const};$$

$$T_w(t) = T_w = \text{const};$$

$$T_v(y, x, t) = \left. \begin{cases} T_{v1} - npu & 0 \leq x < x_1; \\ T_{v2} - npu & x_1 \leq x < x_2; \\ T_{v1} - npu & x_2 \leq x < L. \end{cases} \right\} \quad (\text{А.23})$$

З урахуванням умов (А.23) рівняння (А.22) матимуть вигляд:

$$T(x, y, z, t) = T_1(x, y, z, t) + T_2(x, y, z, t);$$

$$T_1 = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}^{**}(t) \cdot \left[ \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \right];$$

$$A_{ijk}^{**}(t) = \frac{64}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k} \cdot \left[ T_0 \cdot e^{-k_1 \cdot t} + T_w \cdot (1 - e^{-k_1 \cdot t}) \right];$$

$$T_2 = \left(1 - \frac{z}{b}\right) \cdot \sum_{j=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{k=1,2,3,\dots}^{\infty} A_{jk}^* \cdot \left[ \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{ijk}(t) \cdot \left[ \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z}{b}\right) \right];$$

$$A_{jk}^* = -\frac{8}{\pi^2 i \cdot k} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[ (T_{v1} + T_w) \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_1}{L}\right) \right] + \right. \\ & \left. + (T_{v2} + T_w) \cdot \left[ \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_1}{L}\right) - \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_2}{L}\right) \right] + \right. \\ & \left. + (T_{v2} + T_w) \cdot \left[ \cos\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_2}{L}\right) - \cos(k \cdot \pi) \right] \right\}; \end{aligned} \right. \quad (\text{А.24})$$

$$A_{ijk} = -\frac{2 \cdot k_3}{i \cdot \pi \cdot k_1} \cdot (1 - e^{-k_1 \cdot t}) \cdot A_{jk}^*;$$

$$k_1 = a_{red} \cdot \left[ \left(\frac{i \cdot \pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{L}\right)^2 \right]; \quad k_2 = \frac{8}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k};$$

$$k_3 = a_{red} \cdot \left[ \left(\frac{j \cdot \pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{k \cdot \pi}{L}\right)^2 \right]; \quad C_{ijk} = \frac{64 \cdot (T_0 - T_w)}{\pi^3 \cdot i \cdot j \cdot k};$$

$$i = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad j = 1, 3, 5, \dots, \infty; \quad k = 1, 3, 5, \dots, \infty.$$

## ДОДАТОК Б. РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В ТІЛІ ДЕРЕВ'ЯНОЇ КОЛОНИ ДЛЯ ВИПАДКУ ОДНОВИМІРНОЇ ЗАДАЧІ

У цьому додатку представлені виконані дослідження з визначення температурного поля в колоні для спрощеної розрахункової схеми (одновимірний випадок).

Розрахункова схема колони представлена на рис. Б.1. Для вирішення завдання в даному випадку слід використовувати наступне диференціальне рівняння:

$$a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}; \quad x \in (0, b). \quad (Б.1)$$

де  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$  - коефіцієнт приведеної теплопровідності;  $T$  - температура;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності деревини;  $\rho$  - щільність деревини;  $c_p$  - питома теплоємність деревини;  $t$  - час;  $b$  - ширина перерізу колони.

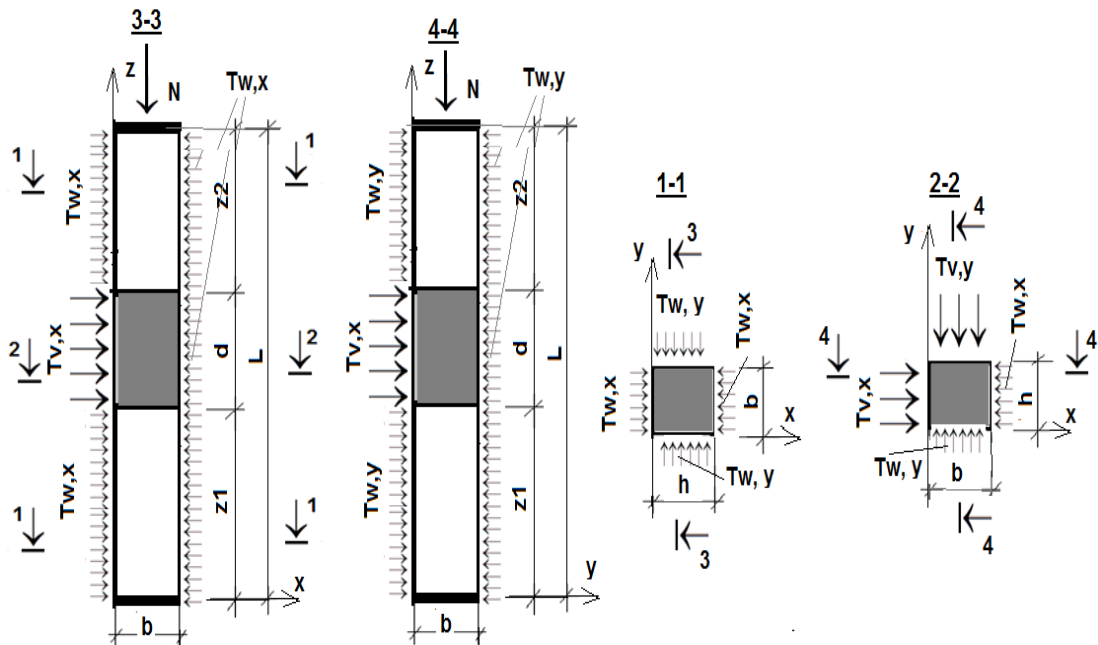


Рис. Б.1. Розрахункова схема.

Сірим кольором позначено розрахункову область.

Початкова та граничні умови в даному випадку мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T(x, 0) &= T_0; \\ T(0, t) &= T_v(t); \\ T(b, y, z, t) &= T_w(t). \end{aligned} \right\} \quad (Б.2)$$

Для вирішення задачі був використаний метод Рітца [62, 63, 108]. Розв'язок був представлений у вигляді:

$$T(x, t) = T_w(t) + [T_v(t) - T_w(t)] \cdot \left(1 - \frac{x}{b}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{b}\right), \quad (\text{Б.3})$$

де  $c_i(t)$  - змінні що залежать від функції часу.

Підставивши (Б.3) в (Б.1), та помноживши обидві частини отриманого рівняння на  $\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot t}{b}\right)$  було проінтегровано результат на інтервалі  $x \in (0, b)$ , отримано:

$$\frac{dc_i(t)}{dt} + \frac{a \cdot \pi^2 \cdot i^2}{b^2} \cdot c_i(t) + 2 \cdot \frac{\frac{dT_v(t)}{dt} - \frac{dT_w(t)}{dt} \cdot \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi} = 0, \quad (\text{Б.4})$$

Розв'язком (Б.4) є наступна функція :

$$c_i(t) = -\frac{2 \cdot \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi} \cdot \int_0^t e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{b^2} \cdot (t-\tau)} \cdot \left[ \frac{dT_v(\tau)}{d\tau} - \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau + c_i(0) \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{b^2} \cdot t}, \quad (\text{Б.5})$$

де  $c_i(0)$  – коефіцієнти, що розраховуються для забезпечення початкових умов.

Для визначення коефіцієнтів  $c_i(0)$  підставили (Б.5) в (Б.3) і прийняли час рівним нулю. Крім того, прирівняли отриманий вираз до початкової температури  $T_0$  (тобто врахована початкова умова). отримали:

$$T(x, 0) = T_w(0) + [T_v(0) - T_w(0)] \cdot \left(1 - \frac{x}{b}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i(0) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{b}\right) = T_0, \quad (\text{Б.6})$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів помножили обидві частини (Б.6) на функцію  $\sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{b}\right)$  і проінтегрували отримане таким чином рівняння на інтервалі  $x \in (0, b)$  отримали:

$$c_i(0) = 2 \cdot T_0 \cdot \frac{1 - \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi} - \frac{T_v(0) - T_w(0) \cdot \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi}. \quad (\text{Б.7})$$

З урахуванням (Б.27) і (Б.25) вирішення задачі має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T(x, t) &= T_w(t) + [T_v(t) - T_w(t)] \cdot \left(1 - \frac{x}{b}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{b}\right); \\ c_i(t) &= -\frac{2 \cdot \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi} \cdot \int_0^t e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{b^2} \cdot (t-\tau)} \cdot \left[ \frac{dT_v(\tau)}{d\tau} - \frac{dT_w(\tau)}{d\tau} \right] \cdot d\tau + \\ &\quad + c_i(0) \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{b^2} \cdot t}; \\ c_i(0) &= 2 \cdot T_0 \cdot \frac{1 - \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi} - \frac{T_v(0) - T_w(0) \cdot \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi}. \end{aligned} \right\} (\text{Б.8})$$

Для використання рівняння (Б.8) для практичних розрахунків необхідно заздалегідь знати зміну температури в зоні нагріву. При цьому функція зміни температури в часі на поверхні колони повинна бути диференційована, що не завжди можливо. В зв'язку з цим цікавими випадками, коли температура на поверхні колони залишається постійною в часі або змінюється за законом ступінчастої лінії. В останньому випадку шляхом варіювання величини ступені і часу її дії є можливість апроксимувати практично будь-який закон зміни температури в часі.

Для того, щоб перейти до постійної в часі температури нагріву слід ввести в (Б.8):

$$\left. \begin{aligned} T_w(t) &= T_w = const; \\ T_v(t) &= T_v = const. \end{aligned} \right\} \quad (\text{Б.9})$$

З врахуванням (Б.9) рівняння (Б.8) має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T(x, t) &= T_w + (T_v - T_w) \cdot \left(1 - \frac{x}{b}\right) + \\ &+ \sum_{i=1}^{\infty} c_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{b}\right); c_i(t) = c_i(0) \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{b^2} t}; \\ c_i(0) &= 2 \cdot T_0 \cdot \frac{1 - \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi} - \frac{T_v - T_w \cdot \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{Б.10})$$

Використавши ступінчасті функції Хевісайда закон зміни в часі граничних умов може бути представлений у вигляді

$$T_v(t) = \sum_{j=1}^n T_{v,j} \cdot U(t - t_j); \quad T_w(t) = \sum_{j=1}^n T_{w,j} \cdot U(t - t_j). \quad (\text{Б.11})$$

Тут  $U(t - t_j)$  - ступінчаста функція Хевісайда [94]; - збільшення температури на поверхні нагріву в момент часу  $t_j$ .

З урахуванням (Б.11) рівняння (Б.10) може бути представлено у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} T(x, t) &= \sum_{j=1}^n U(t - t_j) \left\{ T_{w,j} + (T_{v,j} - T_{w,j}) \cdot \left(1 - \frac{x}{b}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^{\infty} c_{ij}(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{b}\right) \right\}; \\ c_{ij}(t) &= c_{ij}(0) \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{b^2} (t - t_j)}; \\ c_{ij}(0) &= 2 \cdot T_0 \cdot \frac{1 - \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi} - \frac{T_{v,j} - T_{w,j} \cdot \cos(i \cdot \pi)}{i \cdot \pi}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{Б.12})$$

Співвідношення (Б.8), (Б.10) і (Б.12) дозволяють вирішити практично всі випадки локального нагріву колон які зустрічаються в практиці проектування.

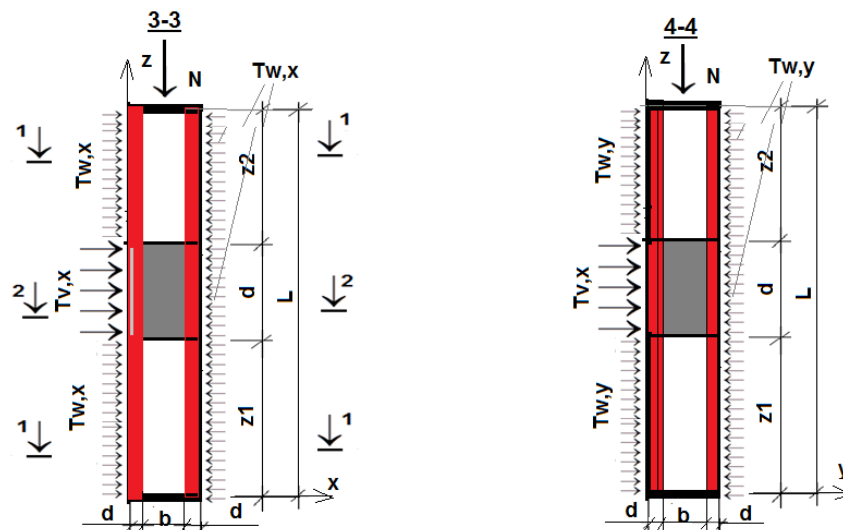
Потрібно відмітити, що формули (Б.8), (Б.10) і (Б.12) дозволяють визначати температурне поле всередині дерев'яних колон при різній температурі їх нагрівання з боку всіх її чотирьох сторін. В цьому випадку слід використовувати представлену на малюнку Б.3 розрахункову схему і принцип суперпозиції.

## ДОДАТОК В. РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ В ДЕРЕВ'ЯНІЙ КОЛОНІ З ВОГНЕЗАХИСТОМ ДЛЯ ВИПАДКУ ОДНОВИМІРНИХ ЗАДАЧ

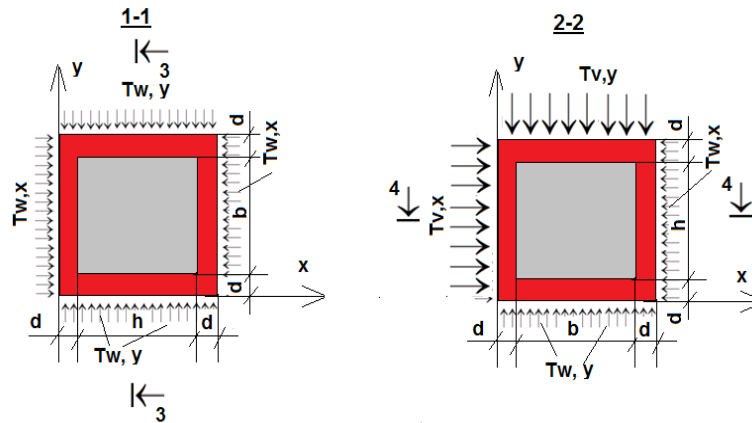
У цьому додатку представлені матеріали досліджень, необхідних для визначення температурного поля в колоні з вогнезахистом. При цьому розглянуто одновимірний випадок. Розрахункова схема колони з вогнезахистом представлена на рисунку В.1.

Завдання теоретичних досліджень було сформульовано наступним чином:

1. Дерев'яна колона з поперечним перерізом  $b \times h$  захищена шаром вогнезахисту товщиною  $d$ .
2. Теплофізичні характеристики матеріалу вогнезахисту наступні:
  - питома вага  $\gamma_1$ ;
  - густина  $\rho_1$ ;



В.1. Розрахункова схема. Сірим кольором позначено розрахункову область. Червоним – вогнезахист.



В.2. Розрахункова схема. Сірим кольором позначено розрахункову область. Червоним – вогнезахист.

- питома теплоємність  $c_{p1}$ ;
- коефіцієнт кондуктивної теплопровідності  $\lambda_1$ .

3. Теплофізичні характеристики деревини колони наступні:

- питома вага  $\gamma_2$ ;
- густина  $\rho_2$ ;
- питома теплоємність  $c_{p2}$ ;
- коефіцієнт кондуктивної теплопровідності  $\lambda_2$ .

4. Температура на межі вогнезахисту:

- при  $x = 0$  -  $T_v$ ;
- при  $x = b + 2 \cdot d$  -  $T_w$ .

5. Потрібно:

5.1. Визначити температуру в будь-якому довільному перерізі колони в момент часу  $t \rightarrow \infty$ .

5.2. Визначити температуру в будь-якому довільному перетині першого шару вогнезахисту в момент часу  $t \in (0, \infty)$ .

5.3. Визначити температуру на контактні вогнезахисту і матеріалу колони (тобто при  $x = d$ ) в будь-який момент часу.

5.4. Визначити час досягнення розрахункового значення температури на контактні вогнезахисного шару і матеріалу колони.



6. При вирішенні задачі розглянути односторонній нагрів згідно схеми поданої на рис. В.1.

Для визначення температури в системі «вогнезахисний шар - колона» було враховано, що при затуханні перехідних процесів залежність температури від координати має вигляд прямої лінії. Крім того, було прийнято на контакті шарів умови ідеального теплового контакту.

Таким чином, розподіл температури в системі «вогнезахисний шар - дерев'яна колона» при необмеженому зростанні часу нагрівання має вигляд:

$$T(x) = \begin{cases} T_1(x) = a_1 + b_1 \cdot x & \text{при } x \in (0, d); \\ T_2(x) = a_2 + b_2 \cdot (x - d) & \text{при } x \in (d, b + d); \\ T_3(x) = a_3 + b_3 \cdot (x - d - b) & \text{при } x \in (b + d, b + 2 \cdot d); \end{cases} \quad (\text{В.1})$$

де  $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$  - коефіцієнти які потрібно визначити.

Для визначення коефіцієнтів необхідно досягнути виконання наступних умов:

1. Гранична умова при  $x = 0$ :  $\lim_{x \rightarrow 0} T_1(x) - T_v = 0$ .
2. Гранична умова при  $x = 2 \cdot d + b$ :  $\lim_{x \rightarrow 2 \cdot d + b} T_3(x) - T_w = 0$ .
3. Рівності температур на контакті вогнезахисного покриття та деревини колони при  $x = d$ :  $\lim_{x \rightarrow d} [T_1(x) - T_2(x)] = 0$ .
4. Рівності температур на контакті вогнезахисного покриття та деревини колони  $x = d + b$ :  $\lim_{x \rightarrow d + b} [T_2(x) - T_3(x)] = 0$ .
5. Однакових швидкостей зміни температур на контакті вогнезахист – матеріал колони при  $x = d$ :  $\lim_{x \rightarrow d} \left[ \lambda_1 \frac{dT_1(x)}{dx} - \lambda_2 \frac{dT_2(x)}{dx} \right] = 0$ .
6. Однакових швидкостей зміни температур на контакті вогнезахист – матеріал колони при  $x = d + b$ :  $\lim_{x \rightarrow d + b} \left[ \lambda_2 \frac{dT_2(x)}{dx} - \lambda_1 \frac{dT_3(x)}{dx} \right] = 0$ .

Таким чином для визначення шести невідомих коефіцієнтів ми маємо систему їх шести лінійних алгебраїчних рівнянь, рішення яких і є рішенням даної задачі:

$$T(x) = \left\{ \begin{array}{l} a_1 + b_1 \cdot x \text{ при } x \in (0, d); \\ a_2 + b_2 \cdot (x - d) \text{ при } x \in (d, b + d); \\ a_3 + b_3 \cdot (x - d - b) \text{ при } x \in (b + d, b + 2 \cdot d); \\ a_1 = Tv; \\ a_2 = \frac{(2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_2) \cdot Tv + \lambda_2 \cdot d \cdot Tw}{zn}; \\ a_3 = \frac{(2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_2) \cdot Tw + \lambda_2 \cdot d \cdot Tv}{zn}; \\ b_1 = -\frac{\lambda_2 \cdot (Tv - Tw)}{zn}; \\ b_2 = -\frac{\lambda_1 \cdot (Tv - Tw)}{zn}; \\ b_3 = -\frac{\lambda_2 \cdot (Tv - Tw)}{zn}; \\ zn = 2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1. \end{array} \right. \quad (\text{B.2})$$

Рівняння (B.2) дозволяють сформулювати умову вогнестійкості дерев'яної колони для будь-якого часу в інтервалі часу  $t \in (0, \infty)$ :

$$T_p \leq T(d) = Tv - \frac{\lambda_2 \cdot (Tv - Tw) \cdot d}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} \quad (\text{B.3})$$

Якщо задатися товщиною теплоізоляції, то з (B.3) можна знайти необхідне значення коефіцієнта теплопровідності матеріалу вогнезахисту:

$$\lambda_1 \leq \frac{\lambda_2 \cdot (2 \cdot T_p - Tv - Tw) \cdot d}{b \cdot (Tv - T_p)} \quad (\text{B.4})$$

Крім цього, з (B.3) можна знайти товщину шару теплозахисту для випадку, коли відомі теплотехнічні властивості матеріалу вогнезахисту і колони:

$$d \geq \frac{b \cdot \lambda_1 \cdot (Tv - T_p)}{\lambda_2 \cdot (2 \cdot T_p - Tv - Tw)}. \quad (\text{B.5})$$

При проектуванні вогнезахисту (утеплювача) також важливо знати час досягнення критичної температури деревини на контакті вогнезахисту (теплозахисту) і матеріалу колони

Таке завдання виникає в тому випадку, коли забезпечити теплозахист конструкції на весь термін експлуатації конструкції або неможливо або економічно невигідно.

Розглянемо ділянку утеплювача в інтервалі довжин  $x \in (0, d)$ . Температура на цій ділянці конструкції при  $t \rightarrow \infty$  відома і дорівнює:

$$T_1(x, \infty) = T(x, \infty) = T_v - \frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} \cdot x. \quad (\text{B.6})$$

Рішення задачі в даному випадку зводиться до вирішення рівняння теплопереносу, яке в одновимірному випадку має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} a_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1(x, t)}{\partial x^2} &= \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t}; \\ a_1 &= \frac{\lambda_1}{\rho_1 \cdot c_{p1}}. \end{aligned} \right\} (\text{B.7})$$

Крім того, в даному випадку повинні виконуватися граничні умови, і початкова умова, які мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} T_1(x, 0) &= T_0; \\ \lim_{x \rightarrow 0} T_1(x, t) - T_v &= 0; \\ \lim_{x \rightarrow d} [T_1(x, t) - T_2(x, t)] &= 0; \\ \lim_{x \rightarrow d} \left[ \lambda_1 \frac{dT_1(x, t)}{dx} - \lambda_2 \frac{dT_2(x, t)}{dx} \right] &= 0. \end{aligned} \right\} (\text{B.8})$$

Для вирішення задачі використовуємо метод Рітца [62, 63, 108]. В якості початкового наближення приймемо (B.7). Оскільки (B.5) точно задовольняє граничним умовам (B.8), коригуюче рішення повинно мати такі властивості:

- дорівнювати нулю на границях розглянутої ділянки (тобто при  $x = 0$  і  $x = d$ );
- перша похідна коригуючого рішення по координаті при  $x = d$  повинна дорівнювати нулю;
- функція  $T_1(x, t)$  повинна бути парною в інтервалі  $x \in (0, \dots, 2 \cdot d)$  відносно точки  $x = d$ .

Відповідно до описаного, рішення задачі шукаємо у вигляді:

$$T_1(x, t) = \begin{cases} T_v - \frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} \cdot x + \\ \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} A_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot d}\right) - n_{pi} & x \in (0 \dots d); \\ \frac{2 \cdot \lambda_2 \cdot d \cdot T_w + b \cdot \lambda_1 \cdot T_v}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} + \frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} \cdot x + \\ \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} A_i(t) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot d}\right) - n_{pi} & x \in (d \dots 2 \cdot d). \end{cases}, \quad (\text{B.9})$$

де  $A_i(t)$  - підлягає визначенню шляхом вирішення рівняння (В.8) і задовольняє початковій умові (В.9) функції часу.

Помноживши обидві частини (В.9) на спільний множник  $\sin\left(\frac{i\cdot\pi\cdot x}{2\cdot d}\right)$  і проінтегрувавши отриману таким чином рівність на інтервалі  $x \in (0 \dots 2 \cdot d)$  по змінній «х», знайдемо:

$$\frac{dA_i(t)}{dt} + a \cdot \frac{i^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot d^2} \cdot A_i(t) = 0. \quad (\text{В.10})$$

рішення (Б.22) має вигляд:

$$A_i(t) = A_i(0) \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot d^2} \cdot a \cdot t}. \quad (\text{В.11})$$

Невідомі коефіцієнти  $A_i(0)$  знайдемо шляхом вирішення рівняння:

$$\lim_{t \rightarrow 0} [T_1(x, t), t = 0] - T_0 = 0, \quad (\text{В.12})$$

звідки

$$A_i(0) = \frac{4}{i \cdot \pi} \cdot (T_v - T_0) - \frac{8 \cdot \lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{i^2 \cdot \pi^2 \cdot (2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1)} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right), \quad (\text{В.13})$$

З врахуванням (В.9), (В.12) і (В.13) остаточне рішення задачі має вигляд:

$$T_1(x, t) = T_v - \frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} \cdot x + \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{4}{i \cdot \pi} \cdot (T_v - T_0) - \frac{8 \cdot \lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{i^2 \cdot \pi^2 \cdot (2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1)} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right) \right] \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot d^2} \cdot a \cdot t} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot d}\right); \quad (\text{В.14})$$

Для визначення часу досягнення температурою в перетині «х» розрахункового значення  $T_p$  слід вирішити рівняння виду:

$$T_p - T_1(x, t) = T_p - T_v + \frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} \cdot x - \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{4}{i \cdot \pi} \cdot (T_v - T_0) - \frac{8 \cdot \lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{i^2 \cdot \pi^2 \cdot (2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1)} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi}{2}\right) \right] \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot d^2} \cdot a \cdot t} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{2 \cdot d}\right) = 0. \quad (\text{В.15})$$

Для зручності розкладемо функцію  $T_p - T_v + \frac{\lambda_2 \cdot (T_v - T_w)}{2 \cdot \lambda_2 \cdot d + b \cdot \lambda_1} \cdot x$  в інтервалі  $x \in (0 \dots 2 \cdot d)$  в ряд Фур'є і підставимо отриманий таким чином результат в (В.15) і приймемо  $x = d$ . Отримаємо:

$$\sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{-\frac{4}{i\pi} \cdot (T_v - T_p) +}{+\frac{8\lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{i^2 \cdot \pi^2 \cdot (2\lambda_2 \cdot d + b\lambda_1)}} \cdot \sin\left(\frac{i\pi}{2}\right) \right] \cdot \sin\left(\frac{i\pi}{2}\right) = 0. \quad (\text{B.16})$$

$$\sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} + \left[ \frac{\frac{4}{i\pi} \cdot (T_v - T_0) -}{-\frac{8\lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{i^2 \cdot \pi^2 \cdot (2\lambda_2 \cdot d + b\lambda_1)}} \cdot \sin\left(\frac{i\pi}{2}\right) \right] \cdot e^{-\frac{i^2 \cdot \pi^2}{4 \cdot d^2} \cdot a \cdot t} \cdot \sin\left(\frac{i\pi}{2}\right) = 0. \quad (\text{B.17})$$

Отримавши в ряді (Б.28) перший доданок, знайдемо:

$$\left[ \frac{\frac{4}{\pi} \cdot (T_v - T_0) -}{-\frac{8\lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{\pi^2 \cdot (2\lambda_2 \cdot d + b\lambda_1)}} \right] \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4 \cdot d^2} \cdot a \cdot t} = \left[ \frac{\frac{4}{\pi} \cdot (T_v - T_p) -}{-\frac{8\lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{\pi^2 \cdot (2\lambda_2 \cdot d + b\lambda_1)}} \right],$$

звідки

$$e^{-\frac{\pi^2}{4 \cdot d^2} \cdot a \cdot t} = \frac{T_v - T_p - \frac{2\lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{\pi \cdot (2\lambda_2 \cdot d + b\lambda_1)}}{T_v - T_0 - \frac{2\lambda_2 \cdot d \cdot (T_v - T_w)}{\pi \cdot (2\lambda_2 \cdot d + b\lambda_1)}}$$

звідки

$$t = -\frac{4 \cdot d^2}{a \cdot \pi^2} \ln \left[ \frac{\frac{\pi}{2} \frac{T_v - T_p}{T_v - T_w} \left(1 + \frac{b\lambda_1}{2\lambda_2 \cdot d}\right) - 1}{\frac{\pi}{2} \frac{T_v - T_0}{T_v - T_w} \left(1 + \frac{b\lambda_1}{2\lambda_2 \cdot d}\right) - 1} \right]. \quad (\text{B.18})$$

Таким чином отримано розв'язок рівняння розподілу температури в дерев'яній колоні з вогнезахистом для випадку одновимірної задачі.

**ДОДАТОК Д. АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ**

**«КАРАТ БУД ПЛЮС»**

у формі товариства з обмеженою відповідальністю

\*\*\*\*\*  
89636, Закарпатська область, Мукачівський район, смт. Кольчино, вул. Спортивна, 2  
Поштова адреса: м. Ужгород, вул. Минайська, 16, каб. 9, [karatbudplus@gmail.com](mailto:karatbudplus@gmail.com)

22 лютого 2019 року № 12

**ДОВІДКА  
про впровадження результатів наукових досліджень**

Результати дисертаційного дослідження Пелеха Андрія Богдановича на тему “Несуча здатність та деформативність стиснутих дерев’яних елементів при локальному впливі високих температур” впровадженні при будівництві житлового будинку на вул. Ів. Франко - Великогірній у м. Мукачево за системою Wolf.

При розробленні робочої документації для будівництва житлового будинку за адресою: вул. Ів. Франко - Великогірній у м. Мукачево, були застосовані дерев’яні дощатоклеєні колони захищені вогнетривкими гіпсокартонними листами. Рішення про застосування вогнезахисту з гіпсокартонних листів було прийнято за результатами досліджень здобувача Пелеха Андрія Богдановича з поданими рекомендаціями щодо виконання заходів для вогнезахисту дерев’яних конструкцій.

В результаті запропонованих рішень було запроектовано основні вузли з вогнезахисту дерев’яних несучих колон з метою досягнення межі вогнестійкості R60, що дозволило застосувати дерев’яні конструкції для будівництва житлового будинку.

Директор



В.М.Гісем



**ФО-підприємець Ткач Андрій Ігорович**

вул. Пасічна, 171/102, м. Львів, 79032

Тел (067) 67-38-344

E-mail: [budteam.project@gmail.com](mailto:budteam.project@gmail.com)

[www.budteam-lviv.com](http://www.budteam-lviv.com)

ЄДРПОУ - 3248009051 р /р 26009053824176

в ПрАТ «Приват Банк» м. Львів, МФО 325321,

01 вересня 2020 р.

№1/09Т  
м. Львів

## ДОВІДКА

### про впровадження результатів наукових досліджень

Результати дисертаційного дослідження Пелеха Андрія Богдановича на тему «Несуча здатність та деформативність стиснутих дерев'яних елементів при локальному впливі високих температур» впроваджені при проектуванні об'єкта «Реконструкція з розширенням нежитлових приміщень за рахунок надбудови мансардного поверху на вул. Шота Руставелі, 12 у м. Львові».

При розробці робочого проекту, були застосовані рекомендації Пелеха А.Б по застосуванню додаткового вогнезахисту для підвищення вогнестійкості несучих дерев'яних конструкцій. В результаті впроваджених рішень підвищено надійність експлуатації споруди.

ФО-підприємець  
м.п.



А.І. Ткач