

Український науково дослідний інститут цивільного захисту
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

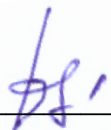
Фещук Юрій Леонідович

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ
ПРОГНОЗУВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН З
ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

Спеціальність - 21.06.02 «Пожежна безпека»
Галузь знань - 261 «Пожежна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії).
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

—  Ю.Л. Фещук

Науковий керівник: **Ніжник Вадим Васильович**
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

АНОТАЦІЯ

Фециук Ю.Л. Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека» (261 – Пожежна безпека) підготовлена в Українському науково-дослідному інституті цивільного захисту ДСНС України.

Ідея роботи полягає у створенні передумов забезпечення нормованої вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням шляхом застосування методології прогнозування меж їх вогнестійкості, яка враховує закономірності впливу конструктивних параметрів, а також навантаження таких колон за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Наукова новизна роботи полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості як наукове підґрунтя методології прогнозування їх значень. При цьому уперше:

- встановлено, що залежність швидкості обвуглювання $v(t)$ дерев'яних колон від тривалості впливу стандартного температурного режиму пожежі t описується формулою, $v(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$ та визначені коефіцієнти даної регресії для таких колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) в один, два шари та без нього;

- встановлено, що залежність меж вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) (y) від розмірів перерізу дерев'яної колони (x_1), товщини вогнезахисного шару (x_2) та прикладеного на дерев'яну колону навантаження (x_3) описується формулою $y = 55,625 + 40,625x_1 + 15,125x_2 - 5,625x_3 + 8,625x_1x_2 - 2,625x_1x_3 + 1,375x_2x_3 + 1,875x_1x_2x_3$;

- з урахуванням виявлених закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням

за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості, обґрунтовано та запропоновано табличний метод їх прогнозування шляхом створення довідникових таблиць з вимогами щодо необхідних геометричних параметрів, товщини облицювання, розмірів перерізу колони та механічного навантаження.

Набуло подальшого розвитку застосування розрахункових табличних методів прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням для визначення відповідних вихідних даних для проектування споруд з їх застосуванням.

Удосконалено науково-методичну базу забезпечення нормованої вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій з вогнезахисним облицюванням.

Аналіз статистичних даних про пожежі за останні 5 років в Україні свідчить, що за цей період відбулось 366911 пожеж, внаслідок яких загинуло 10478 осіб, у тому числі 335 дітей.

Кожна четверта пожежа від загальної їх кількості виникає в спорудах, зведених із застосуванням дерев'яних конструкцій. У 33,3 % випадках таких пожеж конструкції втрачали несучу здатність, що призводило до їх руйнування. Одним із шляхів забезпечення нормованих значень класів вогнестійкості дерев'яних колон є їх вогнезахисне облицювання, зокрема деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB за міжнародною класифікацією).

Аналіз наукових праць, присвячених питанням вогнестійкості дерев'яних конструкцій таких дослідників як: Беліков А.С., Демчина Б.Г., Змага Я.В., Круковський П.Г., Макішев Ж.К., Новак С.В., Пелех А.Б., Поздєєв С.В., Ройтман М.Я., Семерак М.М., Шналь Т.М., Barder D., Bartelemy B., Nordheim E., Janssens M.L., White R. та інших, свідчить, що інформація щодо вогнестійкості вогнезахисних облицюванням плитами OSB дерев'яних колон як будівельних конструкцій є обмеженою. Це стримує застосування зазначених будівельних конструкцій або призводить до помилкових рішень при проектуванні та будівництві споруд з їх використанням, що у свою чергу негативно впливає на пожежну статистику.

Розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на їх вогнестійкість є актуальною науковою задачею, розв'язання якої є науковим підґрунтям створення методології її прогнозування, що створить передумови забезпечення нормованих значень класів вогнестійкості зазначених будівельних конструкцій та підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки споруд з їх застосуванням.

В дисертаційній роботі при проведенні аналізу статистики пожеж та літературного огляду використано аналітичний метод.

Для виявлення основних закономірностей температурних розподілень та параметрів глибини обуглювання використано експериментальні теплофізичні дослідження, результати яких узагальнено математичним моделюванням. Під час розробки розрахункового табличного методу оцінки вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням застосовані стандартні методи розрахунку меж вогнестійкості. Для розробки довідникової таблиці визначення класу вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням проведено повний факторний експеримент.

Вивчення достовірності та адекватності результатів експериментів і моделювання поведінки дерев'яних колон з вогнезахистом у вигляді плит OSB за впливу стандартного температурного режиму пожежі використані методи математичного моделювання, а також методи математичної статистики.

У першому розділі наведено результати аналізу статистичних даних виникнення пожеж в Україні. Встановлено, що за останні 5 років відбулось 366911 пожеж, внаслідок яких загинуло 10478 осіб, у тому числі 335 дітей. Статистичні дані щодо виникнення пожеж в Україні за 2013 – 2017 роки показали, що кожного року кількість пожеж зростає, до того ж близько 50 % від загальної їх чисельності припадає на споруди, четверту частина пожеж по спорудам займають зведені на основі дерев'яних конструкцій.

Проведено аналіз сучасного стану забезпечення і методів оцінювання вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та

виявлено, що недостатньо приділено уваги поверхневому оброблянню, зокрема облицюванню деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB).

На основі аналітичних досліджень щодо методів з визначення межі вогнестійкості дерев'яних конструкцій виділено два основних: метод за Ройтманом М.Я. та метод визначений в Єврокодi 5. В першому – сутність розрахунку зводиться до визначення часу, після закінчення якого при даній швидкості обуглювання деревини площа перерізу елемента зменшиться до критичної позначки. Однак, даний метод не враховує можливий плитний вогнезахист. Другий метод – більш досконалий та враховує ряд коефіцієнтів. Метод з визначення межі вогнестійкості конструкцій представлений в Єврокодi 5 хоча й враховує плитний вогнезахист, однак містить не всі дані необхідні для розрахунку вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB). Недоліком даного методу є відсутність довідкових таблиць прогнозування межі вогнестійкості конкретних конструкцій в залежності від розмірів перерізу конструкцій, діючого навантаження та необхідної товщини вогнезахисту.

Проведені аналітичні дослідження створили передумови для удосконалення методів оцінювання вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням.

У другому розділі розроблено методику проведення експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі за стандартним температурним режимом. В методиці визначено процедуру виготовлення досліджуваних зразків дерев'яних колон. В якості досліджуваних зразків обрано суцільні соснові бруси розмірами $200 \times 200 \times 300$ мм. Брус захищається 2 типами захисту. Здійснюється облицювання по периметру плитою OSB товщиною 10 мм в один, два шари.

Експериментальні дослідження проводяться на базі Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту. Спочатку здійснюється підготовка регламенту, матеріальної бази для вогневих випробувань,

виготовляються досліджувані зразки, далі здійснюється проведення вогневих випробувань у спеціальній вогневій печі. Після проведення випробувань повинні бути отримані такі дані: температурні показники у досліджуваних зразках дерев'яних колон, геометричні параметри зони обвуглювання. Температурні показники отримуються за допомогою термопар, що розташовуються в зразках таким чином, щоб забезпечити наближення ізотерм, які відтворюють температурне поле у перерізі зразка, з метою проведення відтворення температурного розподілення у перерізі під тепловим впливом пожежі за стандартним температурним режимом. Контроль температур здійснюється в такі періоди часу: 15, 30, 60, 90 хв. Геометричні параметри зони обвуглювання отримуються шляхом вимірювання залишкового перерізу за допомогою лінійки з метою визначення закономірностей розвитку зони обвуглювання досліджуваних зразків згідно з розробленою схемою. Для забезпечення відтворення результатів експерименту кожний досліджуваний зразок повинен випробуватися не менше трьох разів.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень поведінки досліджуваних зразків дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі за стандартним температурним режимом для часових проміжків: 15, 30, 60, 90 хвилин у спеціальній вогневій печі.

Проведено дослідження поведінки зразків, зняті температурні показники у контрольних точках кожного зразка та побудовано відповідні графіки. Перевірено достовірність даних отриманих температур шляхом математичного розрахунку із залученням спеціальних програмних комплексів. Зокрема проведені розрахунки режимів прогріву зразків із встановленими термопарами та у тих же контрольних точках зразків без термопар. Результати перевірки показали, що отримані температурні показники є адекватними, оскільки відносна похибка складає всього 4,5 %, а критерій Фішера – 0,553, що не перевищує табличного значення.

Отримано показники заміру зони обвуглювання за вісьмома параметрами, підтверджено гіпотезу, що товщина зони обвуглювання дерев'яних колон залежить від товщини вогнезахисту та часу вогневої дії. За отриманими показниками заміру зони обвуглювання побудовано графіки регресійних залежностей швидкостей обвуглювання від часу вогневої дії. Отримані регресійні залежності бічних швидкостей обвуглювання від часу вогневої дії описуються залежностями типу $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$. Також виявлені коефіцієнти регресії для колон з вогнезахисним облицюванням у вигляді плит OSB в один, два шари та без нього.

В четвертому розділі розроблений метод інтерполяції температурних полів у перерізі досліджуваного зразка дерев'яної колони за результатами вимірювань температури у контрольних точках під час їх випробувань.

На основі отриманих температурних показників здійснено апроксимацію температур в перерізах досліджуваних зразків колон по лініям розташування термопар. Взято припущення, що вигляд температурних розподілень по лініям розташування термопар відповідає параболічним залежностям, варіювання степеню виразу, який описує такі залежності за умови мінімізації середньоквадратичної нев'язності, дає можливість отримати його у вигляді, що найбільш точно відтворює результати вимірювань.

Проведено апроксимацію температурних розподілень по лініям розташування термопар та перевірено її адекватність. Результати апроксимації подані у графічному вигляді. Використовуючи розроблений метод інтерполяції, визначені розподілення температури у перерізі досліджуваних зразків із вогнезахистом на основі результатів проведених температурних вимірювань під час їх вогневих випробувань. Температурні розподіли побудовані у вигляді поверхонь та ізотерм у відповідних перерізах для кожного моменту часу випробувань. Перевірено адекватність апроксимації температури по перерізу зразків.

Здійснено математичне описання зони обвуглювання досліджуваних зразків з вогнезахисним облицюванням та без нього. Взято гіпотезу про те, що обвуглена частина перерізу повинна залежати від його прогрівання до критичної

температури. З огляду на це, зона обвуглювання має бути обмежена ізотермою, відповідною критичній температурі, при якій відбувається 80 % – 90 % перетворення деревини на вугілля. Визначено критичні температури обвуглювання деревини та змодельовані зони обвуглювання для зразків колон із вогнезахисними облицюванням і без нього, підданих випробуванням.

У п'ятому розділі для визначення геометричних параметрів приведенного перерізу дерев'яних колон з врахуванням обвугленої зони запропоновано метод з використанням величини «критичної температури обвуглювання». Розроблено схему визначення ширини приведенного перерізу дерев'яної колони із квадратним перерізом із використанням величини «критичної температури обвуглювання». Критична ширина перерізу дозволила визначити інші його геометричні параметри та використати їх для розрахунку несучої здатності дерев'яних колон із вогнезахисним облицюванням та без нього.

Для розрахунку несучої здатності дерев'яних колон в умовах пожежі із стандартним температурним режимом з врахуванням обвугленої зони використано метод рекомендований ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 та ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012.

Створення таблиць для запропонованого інженерного методу оцінки класів вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням здійснювалося за методикою, в якій визначено такі процедури: вибиралися найбільш значущі параметри дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням, що впливають на їх вогнестійкість; будувалися універсальні апроксимаційні моделі з метою розв'язку теплотехнічної та міцнісної задач для дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням із змінними параметрами, які є значущими щодо впливу на клас вогнестійкості; створювалася математична модель на основі прийнятої регресійної залежності; складався план повного факторного обчислювального експерименту; проводився повний факторний обчислювальний експеримент з використанням створених плану експерименту та апроксимаційних моделей із змінним параметрами; визначалися коефіцієнти регресійної залежності та побудована математична

модель залежності межі вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням від вибраних параметрів; на основі побудованої математичної моделі складено відповідну таблицю типу стосовно мінімальних проектних параметрів дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням для забезпечення потрібного класу вогнестійкості.

Перевірено адекватність результатів, отриманих за регресійною залежністю за абсолютним та відносним відхиленням. Встановлено, що зазначені відхилення складають не більше 15%.

На основі проведених досліджень обґрунтовано та запропоновано розрахунковий табличний метод для оцінювання вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) шляхом створення довідникової таблиці з вимогами щодо необхідних геометричних параметрів, товщини облицювання, розмірів перерізу колони та механічного навантаження, що здатний спростити проведення розрахунків та може доповнити існуючу нормативну базу.

Ключові слова: вогнестійкість, дерев'яна колона, облицювання, зона обуглювання, товщина вогнезахисту, критична температура, повний факторний експеримент.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис // Пожежна безпека: збірник наукових праць ЛДУБЖД. – Львів, 2017. – Вип. 30. – С. 159 – 167.

2. Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис, Ю.В. Долішній // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2017. – Вип. 1 (3). – С. 98 – 103.

3. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв,

В.В. Ніжник // Проблемы пожарной безопасности: сборник научных трудов. – Харків, 2017. – Вип. 42. – С. 155 – 164.

4. Геометрія зони обвуглення дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2018. – Вип. 1 (5). – С. 4 – 12.

5. Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник // Международный научный журнал "Интернаука". – 2018. – Вып. 14. – С. 74 – 81. DOI 10.25313/2520-2057-2018-14-4089.

Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:

[1] – здобувач провів літературний огляд щодо впливу вогнезахисного оброблення на геометричні параметри зони обвуглювання колон, а також здійснив аналіз існуючих методів визначення вогнестійкості дерев'яних колон та вияв їх недоліки.

[2] – здобувач розробив методику експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі та науково обґрунтував її основні положення.

[3] – здобувач опрацював отримані дані в ході проведення експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі та виявив основні закономірності температурного відклику у поперечному перерізі колон, а також встановив зв'язок між геометричною конфігурацією зони обвуглювання та температурними показниками.

[5] здобувач розробив методологію прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням.

Апробація матеріалів дисертації:

1. Фещук Ю.Л. Актуальність використання розрахункових методів для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій / Ю.Л. Фещук // Матеріали 18 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників «Сучасний

стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до європейського простору». – Київ. – 2016. – С. 305 – 306.

2. Фещук Ю.Л. Актуальність дослідження вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахистом / Ю.Л. Фещук // Матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». – Київ. – 2017. – С. 446 – 448.

3. Фещук Ю.Л. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2017. – С. 51 – 54.

4. Фещук Ю.Л. Залежність глибини обуглювання дерев'яних колон з вогнезахистом та без нього від часу вогневого впливу / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис. // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Пожежна безпека: проблеми та перспективи». – Харків. – 2018. – С. 75 – 77.

5. Фещук Ю.Л. Зміна температури в шарах дерев'яної колони з вогнезахисним облицюванням та без нього від часу вогневого впливу / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв // Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності». – Львів. – 2018. – С. 75 – 77.

6. Фещук Ю.Л. Скорость обугливания деревянных колонн с огнезащитной облицовкой и без нее / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев // Сборник материалов XII международной научно-практической конференции молодых ученых «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы». – Минск. – 2018. – С. 91 – 92.

7. Фещук Ю.Л. Адекватність вимірювання у фрагментах дерев'яних колон під час вогневих випробувань / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Технології та інфраструктура транспорту». – Харків. – 2018. – С. 311 – 313.

ABSTRACT

Feshchuk Y.L. Prediction of fire resistance of wood columns covered with fire resistant coating. – A qualification scientific paper exercised as typescript.

A dissertation for the competition of the scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) (Philosophy Doctor) by specialty of 21.06.02 “Fire safety” (261 – Fire safety) prepared at the Ukrainian Civil Protection Research Institute (UkrCPRI).

Idea of the paper lies in the creation of preconditions for the ensuring of the rated fire resistance ratings of wood columns covered with fire retardant coating by way of application of proper methodology for the prediction of their fire resistance ratings which takes into account trends in the influence of the construction parameters as well as loading applied upon such columns under standard time-temperature curve regime.

Scientific idea of the paper lies in the revelation of the trends of the influence of the construction parameters as well as loading applied on the wood columns covered with fire retardant coating under standard time-temperature curve regime upon their fire resistance ratings as scientific substantiation for the methodology for the prediction of their values. At that for the first time:

- was revealed that dependency of carbonization rate $v(t)$ on wood columns upon duration of influence of standard time-temperature curve regime t was described by the following equation: $v(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$; moreover, coefficients for this regression were determined applied to the columns covered with fire retardant coating formed of wood particle boards and oriented strand boards (OSB) applied in a single or two layers or otherwise having no one;

- it was found that dependency of fire resistance rating of the wood columns covered with fire retardant coating consisting of wood particle boards and oriented strand boards (OSB) (y) upon dimensions of the wood column section (x_1), thickness of fire retardant layer (x_2) and loading applied of the wood column (x_3) was described by the following equation: $y = 55,625 + 40,625x_1 + 15,125x_2 - 5,625x_3 + 8,625x_1x_2 - 2,625x_1x_3 + 1,375x_2x_3 + 1,875x_1x_2x_3$;

– taking into account trends of influence of the construction parameters having been revealed as well as loading applied upon wood columns covered with fire retardant coating under standard time-temperature curve regime upon their fire resistance ratings; a tabular method for the determination of the latter was substantiated and proposed by way of development of appropriate reference containing requirements for the necessary geometrical parameters, coating thickness, column section dimensions and mechanical load.

Application of calculation tabular methods for the prediction of the fire resistance rating of wood columns covered with fire retardant coating for the purpose of determination of appropriate input data for the designing of buildings using them gained further development.

Scientific and methodical basis for the ensuring of rated fire resistance of wood building constructions covered with fire retardant coating was improved.

Analysis of the statistical data on fires for the last 5 years in Ukraine shows that 366,911 fires took place, and 10,478 persons perished because of them, at that 335 of them were children.

Each forth fire (taken from their total quantity) springs in buildings erected using wood constructions. In 33.3 % of the cases of such fires constructions lost their load carrying capacity and this led to their collapse. One of the ways of ensuring rated fire resistance classes of wood columns is their coverage with fire retardant coating, in particular, with wood particle boards and oriented strand boards (OSB according to the international classification).

Analysis of the scientific papers dedicated to the problems related to fire resistance of wood constructions of such researchers as Belikov A.S., Demchina B.H., Zmaha Ya.V., Krukovskyi P.H., Makishev Zh.K., Novak S.V., Pelekh A.B., Pozdieiev S.V., Roitman M.Ya., Semerak M.M., Shnal T.M., Barder D., Bartelemy B., Nordheim E., Janssens M.L., White R. and others shows that information on fire resistance of wood columns covered with OSB slabs as fire resistance coating being used as building constructions is restricted. This detains application of the mentioned building

constructions or otherwise leads to erratic solutions when designing and constructing buildings using them, and this in turn effects negatively on the fire statistics.

Revelation of the specific features of influence of the construction parameters as well as load applied on the wood columns covered with fire retardant coating under standard time-temperature curve regime on their fire resistance is an actual scientific problem solution of which represents scientific substantiation for the creation of appropriate methodology of their prediction, and this is to form proper preconditions for the ensuring of the rated fire resistance ratings of the mentioned building constructions as well as raising efficiency of the ensuring of fire safety of buildings when using them.

Analytical method was used in the dissertation work when conducting analysis of fire statistics.

Experimental thermal and physical studies were used for the revelation of principal trends in the temperature distribution and parameters of carbonization depth, and results of the former were generalized by mathematical modelling. Conventional methods for the calculation of fire resistance rating of wood columns covered with fire retardant coating were applied when developing calculation tabular method. Complete factorial was conducted for the development of the reference table used for the determination of fire resistance class of wood columns covered with fire retardant coating.

While studying of the credibility and adequacy of the experimental results and simulation of the behaviour of wood columns covered with fire retardant coating in the form of OSB slabs under standard time-temperature curve regime we used some methods of mathematical modelling as well as mathematical statistics methods.

The first section contains results of analysing statistical data of fires occurrence in Ukraine. It was revealed that 366,911 fires took place during the last 5 years and 10,478 persons perished because of them, at that 335 of them were children. Statistical data on the occurrence of fires in Ukraine in 2013 to 2017 showed that the number of fires grows from years to year; moreover, nearly 50 % of their general number falls on the buildings erected using wood constructions.

An analysis of the today's condition of ensuring and methods of estimation of fire resistance of wood columns covered with fire retardant coating was conducted and it was revealed that surface treatment, in particular, their coverage with wood particle boards and oriented strand boards (OSB) had not been paid due attention.

Based on the analytical studies on the methods used for the determination of fire resistance ratings of wood constructions we singled out the two principal ones: the method proposed by Roitman M.Ya. and the one described in Eurocode 5. When using the first method essence of the calculation is reduced to the determination of the time interval upon cessation of which at referenced rate of carbonization on wood section of the element reduces to some critical value. At that, this method does not take into account possible fire retardant covering with slabs. The second method is more absolute and takes into account a number of coefficients. Although the methods for the determination of fire resistance rating of the constructions envisaged by Eurocode 5 takes into account fire retardant treatment with slabs, it does not contain any data necessary for the calculation of fire resistance of wood columns covered with fire retardant coating using wood particle stranded boards (OSB). Drawback of this method is unavailability of any reference tables for the prediction of fire resistance ratings of any specific constructions depending on the dimensions of the constructions' section, effective load and necessary thickness of the fire retardant layer.

Analytical studies having been conducted created proper preconditions for the improvement of the methods used for the estimation of fire resistance of wood columns covered with fire retardant coating.

The second section describes development of the method used for the conduction of the experimental researches to study behaviour of the wood columns covered with fire retardant coating under fire conditions applying standard time-temperature curve regime. The method provides procedure of fabrication of samples of wood columns for studying. Solid bars fabricated of pine wood measuring $200 \times 200 \times 300$ mm were chosen as samples to be used when performing researches. The bar is protected with 2 types of protective means. Coverage with 10 mm thick OSB board was done through the perimeter in one or two layers.

Experimental researches are conducted on the base belonging to The Ukrainian Civil Protection Research Institute. At first we prepare proper regulations and material base for fire tests as well as samples under study, then we perform fire tests using special oven. The following data shall be derived upon cessation of the tests: temperature performance throughout the wood column samples under study and geometrical parameters of the carbonization area. The temperature performance is determined with thermocouples to be installed on the samples in such a way that one can ensure mutual approximation of the isotherms to reproduce temperature field within the section of the sample in order to reproduce temperature distribution within the section under fire conditions exposure characterized with standard time-temperature curve regime. Temperature values are monitored at the following time moments: 15, 30, 60, 90 min. Geometrical parameters of the carbonization area are derived by their measuring with a ruler in order to determine trends in the development of the carbonization area at the samples under study as per scheme having been developed. Each of the samples under study shall be tested at least three times in order that the experimental results are reproduced.

The third section contains description of the results of the experimental researches of the behaviour of the wood column samples under study covered with fire retardant coating and having no it under fire conditions exposure characterized with standard time-temperature curve regime for the following time moments: 15, 30, 60, 90 min using special fire oven.

Researches of the samples' behaviour were conducted, temperature indications at various control points of each of the samples were taken, and appropriate curves were plotted. Credibility of the data on the temperature values having been obtained was checked by mathematical calculations using special software complexes. Particularly, calculations were conducted of the samples' warming regimes both using installed thermocouples and not using them for the same control points of the samples. Results of this check-up showed that the temperature performance derived were adequate ones for relative error was as low as 4.5 % and Fischer criterion was equal to 0.533 which did not exceed appropriate tabular value.

We derived parameters to describe carbonization area by eight parameters and confirmed hypothesis that thickness of the carbonization area on the wood columns was dependent on the fire retardant coating thickness and fire exposure duration. Some curves of regression relationships to reflect dependency of the measured parameters of the carbonization area and fire exposure duration were plotted using measured parameters. The regression relationships to describe dependency of sidewall carbonization rates upon fire exposure duration obtained were described by equations of $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$ type. Moreover, regression coefficients for the columns covered with fire retardant coating in the form of OSB slabs laid in one and two layers as well as having no it were revealed.

The forth section contains description of the method of interpolation of the temperature fields in the section of the wood column sample under study using results of the temperature measurement in the control points at the time of their testing having been developed.

Based on the temperature performance derived we realized approximation of the temperatures at the sections of the column samples under study along the thermocouples installation lines. We assumed that the profile of the temperature distribution along the thermocouples installation lines corresponded to some parabolic relationships, and varying of the degree of the relation to describe such dependencies for the minimization of the mean square misalignment allowed deriving it in the form to reflect measurement results with the highest exactness.

We conducted approximation of the temperature distribution along the thermocouples installation lines and checked their adequacy. The approximation results were presented graphically. Using interpolation method having been developed we determined temperature distribution in the sections of the samples covered with fire retardant coating under study based on the results of the temperature measurements taken in the course of fire tests. The temperature distributions were plotted in the form of surfaces and isotherms within appropriate sections for each moment of the testing period. Adequacy of the temperature approximation through the samples section was checked.

Mathematical description of the carbonization area on the samples covered with fire retardant coating and having no it under study was realized. We accepted hypothesis on that the carbonized portion of the section was dependent on its warming to some critical temperature. Taking this into consideration, the carbonization area should have been bounded by some isotherm corresponding to appropriate critical temperatures at which 80 % to 90 % of wood converted to charcoal. Critical temperatures of wood carbonization and carbonization areas were simulated for the samples of the columns covered with fire retardant coating and having no it which were subjected to appropriate tests.

A method envisaging use of “critical carbonization temperature” value is proposed in the fifth section for the purpose of determination of the geometrical parameters of the reduced sections of the wood columns taking into consideration carbonized area. A breakdown for the determination of width of the reduced section of rectangular section wood column using “critical carbonization temperature” value was developed. Critical width of the section allowed determining other geometrical parameters of the latter and their use for the calculation of load bearing capacity of wood columns covered with fire retardant coating and having no it.

We used method recommended by DSTU-N B EN 1995-1-1:2010 and DSTU-N B EN 1995-1-2:2012 in order to calculate load bearing capacity of the columns under fire conditions assuming standard time-temperature curve regime not taking into account carbonized area.

Development of the tables for the proposed engineering method for the estimation of the fire resistance classes of rectangular section wood columns covered with fire retardant coating was performed according to the method to envisage the following procedures: the most significant parameters of rectangular section wood columns covered with fire retardant coating to affect their fire resistance were chosen; universal approximation models were developed for the purpose of solution of appropriate thermal engineering and strength problems for the rectangular section wood columns covered with fire retardant coating characterized with varying parameters which were significant in terms of their influence on the fire resistance class; a mathematical model was

developed based on the assumed regression relationship; complete calculation factorial plan was developed; complete calculation factorial plan was conducted using plan of its conduction developed and approximation models with varying parameters; coefficients of the regression relationship were determined and mathematical model was created for the dependency of fire resistance rating of rectangular section wood columns covered with fire retardant coating on the parameters chosen; based on the developed mathematical model we created appropriate types table to reflect minimum design parameters of rectangular section wood columns covered with fire retardant coating necessary for the ensuring of proper fire resistance class.

Adequacy of the results derived with regression relationship by absolute and relative deviations. It was revealed that the mentioned deviations' values didn't exceed 15 %.

Based on the researches having been conducted we substantiated and proposed calculation tabular method used for the estimation of fire resistance rating of rectangular section wood columns covered with fire retardant coating consisted of wood particle boards with oriented strands (OSB) by way of development of appropriate reference table as to necessary geometrical parameters, coating thickness, dimensions of the column section and mechanical load; this method is able to simplify calculations conduction and can augment existing normative base.

Key words: fire resistance, wood column, coating, carbonization area, thickness of fire retardant coating, critical temperature, complete factorial.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPICS OF DISSERTATION

Published main research results of the dissertation:

1. Fire resistance of wooden columns with membrane fireproofing / Y.L. Feshchuk, S.V. Pozdeyev, V.V. Nizhnyk, O.P. Borys // Fire Safety : Scientific Journal of Lviv State University of Life Safety. – Lviv, 2017. No 30. Pp. 159 – 167.

2. The method of experimental researches of the behavior of wooden columns with membrane fireproofing and without it under fire conditions / Y. Feshchuk, S. Pozdieiev, V. Nizhnyk, O. Borys, Y. Dolishnyi // Scientific bulletin: Civil protection and fire safety. – Kyiv, 2017. No 1 (3). Pp. 98 – 103.

3. Experimental researches of the behavior of wooden columns with membrane fireproofing under fire conditions / Y. Feshchuk, S. Pozdieiev, V. Nizhnyk // Problems of fire safety: collection of scientific papers. – Kharkiv, 2017. No 42. Pp. 155 – 164.

4. Geometry of the charring zone of wooden columns with membrane fireproofing and without in fire conditions / Y. Feshchuk // Scientific bulletin: Civil protection and fire safety. – Kyiv, 2018. No 1 (5). Pp. 4 – 12.

5. Methodology of prediction of fire resistance ratings of wood columns covered with fire retardant coating/ Y. Feshchuk, V. Nizhnyk, S. Pozdieiev // International Scientific Journal “Internauka”, 2018. No 14. Pp. 74 – 81. DOI 10.25313/2520-2057-2018-14-4089.

Personal contribution to the applicant in the work, published in collaboration:

[1] - the applicant conducted a literature review on the effect of flame retardant treatment on the geometric parameters of the charring zone of columns, and also carried out an analysis of existing methods for determining the fire resistance of wooden columns and manifesting their shortcomings.

[2] - the applicant developed a technique for experimental studies of the behavior of wooden columns with fire retardant lining in a fire and scientifically substantiated its main provisions.

[3] - the applicant worked on the obtained data during the experimental studies of the behavior of wooden columns with and without flame retardant under fire conditions and revealed the main regularities of the temperature response in the cross section of the columns, and also established a relationship between the geometric configuration of the charring zone and the temperature indexes.

[5] the applicant developed a methodology for predicting the fire resistance of wooden columns with fire retardant lining.

Approbation of materials thesis:

1. Feshchuk Y. Actuality of the use of calculation methods for assessing the fire resistance of building structures / Y. Feshchuk // Materials of the 18th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Rescuers "The Current State of

Civil Protection of Ukraine: Prospects and Ways to the European Space". – Kyiv. – 2016. – Pp. 305 – 306.

2. Feshchuk Y. Actuality of the study of fire resistance of wooden columns with fire protection / Y. Feshchuk // Materials of the 19th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "The Current State of Civil Protection of Ukraine and Development Prospects». – Kyiv. – 2017. – Pp. 446 – 448.

3. Feshchuk Y. Experimental investigations of the behavior of wooden columns with flame retardant under fire conditions / Y. Feshchuk, S. Pozdieiev, V. Nizhnyk // Materials of VII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation "Emergencies: Security and Defense". – Cherkasy. – 2017. – Pp. 51 – 54.

4. Feshchuk Y. Dependence of the depth of charring of wooden columns with and without fire protection on the time of fire action / Y. Feshchuk, S. Pozdieiev, V. Nizhnyk, O. Borys. // Collection of abstracts of the All-Ukrainian scientific and practical conference "Fire safety: problems and perspectives". – Kharkiv. – 2018. – Pp. 75 – 77.

5. Feshchuk Y. Temperature change in the layers of a wooden column with a flame retardant lining and without it from time of fire influence / Y. Feshchuk, S. Pozdieiev // Collection of scientific works of the XIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students "Problems and Prospects for the Development of the Safety System of Life". – Lviv. – 2018. – Pp. 75 – 77.

6. Feshchuk Y. The rate of charring of wooden columns with and without flame retardant lining / Y. Feshchuk, S. Pozdieiev // Collection of materials of the XII International Scientific and Practical Conference for Young Students "Providing Life Safety: Problems and Perspectives". – Minsk. – 2018. – Pp. 91 – 92.

7. Feshchuk Y. Measurement adequacy in fragmentation of wooden columns during firing tests / Y. Feshchuk, S. Pozdieiev, V. Nizhnyk // Abstracts of the international scientific and technical conference "Technologies and Transport Infrastructure". – Kharkiv. – 2018. – Pp. 311 – 313.

ЗМІСТ

ВСТУП	25
РОЗДІЛ 1	ОЦІНКА СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ТА МЕТОДІВ ЇЇ ОЦІНЮВАННЯ.....
1.1	Аналіз статистичних даних щодо виникнення пожеж на будівельних об'єктах 33
1.2	Область застосування дерев'яних будівельних конструкцій, вимоги нормативних документів щодо вогнестійкості будівельних конструкцій 36
1.3	Способи вогнезахисту дерев'яних конструкцій 39
1.4	Пожежна небезпека і поведінка дерев'яних конструкцій в умовах пожежі 43
1.5	Аналіз існуючих методів оцінки вогнестійкості дерев'яних колон..... 45
1.5.1	Експериментальне визначення вогнестійкості будівельних конструкцій..... 45
1.5.2	Розрахункові методи..... 46
1.5.3	Експериментально-розрахункові методи..... 54
1.6	Ідея роботи, мета та задачі досліджень..... 55
РОЗДІЛ 2	МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....
2.1	Випробувальне обладнання 57
2.1.1	Обладнання та матеріали для виготовлення досліджуваних зразків 57
2.1.2	Обладнання для проведення експериментальних досліджень..... 57
2.1.3	Устаткування для дослідження структури зразків 62
2.2	Методика виготовлення досліджуваних зразків дерев'яних колон..... 62
2.3	Методика досліджень поведінки зразків дерев'яних колон з облицюванням і без нього..... 66
2.4	Методика реалізації теплових режимів нагріву зразків..... 68
2.5	Висновки за розділом..... 72
РОЗДІЛ 3	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МОДЕЛЮВАННЯ.....
3.1	Результати експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі..... 73
3.2	Залежність бічних товщин обвугленого шару зразків від тривалості стандартного температурного режиму пожежі..... 81

3.3	Визначення швидкості обуглювання досліджуваних зразків.....	89
3.4	Оцінка достовірності отриманих результатів вимірювання температури у зразках.....	94
3.4.1	Математична модель теплопровідності у досліджуваному зразку дерев'яної колони при його вогневих випробуваннях.....	94
3.4.2	Чисельний метод розв'язку задачі теплопровідності.....	99
3.4.3	Розрахункові схеми досліджуваної дерев'яної колони.....	102
3.4.4	Кінцево-елементні схеми дерев'яної колони для теплотехнічного розрахунку.....	103
3.4.5	Розрахункові схеми досліджуваної дерев'яної колони.....	104
3.5	Висновки за розділом.....	108
РОЗДІЛ 4	ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПЕРЕРІЗАХ ДОСЛІДЖУВАНИХ ЗРАЗКІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ.....	110
4.1	Метод інтерполяції температурних полів у перерізі досліджуваного зразка дерев'яної колони за результатами вимірювань температури під час випробувань.....	110
4.1.1	Апроксимація температурних розподілень у перерізі досліджуваних зразків дерев'яних колон по лініях розташування термопар.....	110
4.1.2	Адекватність результатів апроксимації температури по лініях розташування термопар.....	113
4.1.3	Інтерполяція температурних розподілів у перерізі досліджуваних зразків дерев'яних колон.....	113
4.2	Результати інтерполяції температур у перерізах досліджуваних зразків дерев'яних колон.....	115
4.3	Адекватність результатів апроксимації температури по перерізу зразків.....	120
4.4	Моделювання процесу обуглювання вогнезахищених зразків дерев'яних колон на основі результатів їх вогневих випробувань.....	122
4.5	Висновки за розділом.....	125
РОЗДІЛ 5	МЕТОДОЛОГІЯ, МЕТОД І МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕЖ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН З ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ.....	127
5.1	Метод визначення геометричних параметрів перерізів дерев'яних колон квадратного перерізу з вогнезахисним облицюванням з врахуванням обугленої зони.....	127
5.2	Метод розрахунку несучої здатності перерізів дерев'яних колон квадратного перерізу з вогнезахисним облицюванням з врахуванням обугленої зони.....	128

5.3	Обґрунтування методики створення таблиць для оцінки класу вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням.....	130
5.3.1	Побудування плану повного факторного експерименту.....	132
5.3.2	Результати розрахунку за створеною математичною моделлю...	136
5.3.3	Перевірка адекватності результатів.....	137
5.4	Обґрунтування удосконаленого табличного методу для оцінки класу вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням.....	138
5.5	Висновки за розділом.....	140
ВИСНОВКИ.....		141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		143
ДОДАТОК А	Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	155
ДОДАТОК Б	Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	158

ВСТУП

Актуальність теми. Аналіз статистичних даних про пожежі за останні 5 років в Україні свідчить, що за цей період відбулось 366911 пожеж, внаслідок яких загинуло 10478 осіб, у тому числі 335 дітей.

Кожна четверта пожежа від загальної їх кількості виникає в спорудах, зведених із застосуванням дерев'яних конструкцій. У 33,3 % випадках таких пожеж конструкції втрачали несучу здатність, що призводило до їх руйнування. Одним із шляхів забезпечення нормованих значень класів вогнестійкості дерев'яних колон є їх вогнезахисне облицювання, зокрема деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB за міжнародною класифікацією).

Аналіз наукових праць, присвячених питанням вогнестійкості дерев'яних конструкцій таких дослідників як: Беліков А.С., Демчина Б.Г., Змага Я.В., Круковський П.Г., Макішев Ж.К., Новак С.В., Пелех А.Б., Поздєєв С.В., Ройтман М.Я., Семерак М.М., Шналь Т.М., Barder D., Bartelemy B., Nordheim E., Janssens M.L., White R. та інших, свідчить, що інформація щодо вогнестійкості вогнезахисних облицюванням плитами OSB дерев'яних колон як будівельних конструкцій є обмеженою. Це стримує застосування зазначених будівельних конструкцій або призводить до помилкових рішень при проектуванні та будівництві споруд з їх використанням, що у свою чергу негативно впливає на пожежну статистику.

Розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на їх вогнестійкість є актуальною науковою задачею, розв'язання якої є науковим підґрунтям створення методології її прогнозування, що створить передумови забезпечення нормованих значень класів вогнестійкості зазначених будівельних конструкцій та підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки споруд з їх застосуванням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження проводилось на виконання «Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої» від 27.06.2014, розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 N 844-р "Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року", під час виконання науково-дослідної роботи в УкрНДЦЗ: «Провести дослідження та встановити загальні положення системи управління пожежною безпекою об'єкта» (№ держреєстрації 0118U003463), в якій здобувач був виконавцем.

Ідея роботи полягає у створенні передумов забезпечення нормованої вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням шляхом застосування методології прогнозування меж їх вогнестійкості, яка враховує закономірності впливу конструктивних параметрів, а також навантаження таких колон за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Мета роботи – розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості як наукове підґрунтя методології прогнозування їх значень.

Для досягнення поставленої мети визначено до розв'язку наступні задачі досліджень:

- провести аналіз статистики пожеж, сучасного стану забезпечення вогнестійкості дерев'яних колон, методів їх оцінювання та виявити шляхи їх удосконалення;

- розробити методику та провести експериментальні дослідження з виявлення залежності швидкості обуглювання дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) та без нього від часу вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі;

- розробити методику інтерполяції розподілу температур в перерізі дерев'яних колон, визначити з її застосуванням відповідні температурні поля та перевірити адекватність результатів інтерполяції;
- розробити методику математичного описування зони обвуглювання дерев'яних колон з різними шарами вогнезахисного облицювання плитами типу OSB за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
- розробити розрахункову методику та з її застосуванням виявити залежності межі вогнестійкості дерев'яної колони з вогнезахисним облицюванням плитами типу OSB від розмірів перерізу дерев'яної колони, товщини плит та прикладеного навантаження;
- розробити розрахунковий табличний метод для оцінювання вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB).

Об'єкт дослідження – вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та процес її прогнозування.

Предмет дослідження – вплив конструктивних параметрів, а також навантаження за умов температурного впливу пожежі дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням на прогнозовані значення межі їх вогнестійкості.

Методи дослідження. При проведенні аналізу статистики пожеж та літературного огляду використано аналітичний метод. Для виявлення основних залежностей температури та товщини зони обвуглювання від часу вогневої дії використані експериментальні теплофізичні дослідження, що узагальнено математичним моделюванням. Під час розробки розрахункового табличного методу оцінки вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням застосовані стандартні методи розрахунку меж вогнестійкості. Для розробки довідникової таблиці визначення класу вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням проведено повний факторний експеримент. Вивчення достовірності та адекватності результатів експериментів і моделювання поведінки дерев'яних колон з

вогнезахистом у вигляді плит OSB за впливу стандартного температурного режиму пожежі використані методи математичного моделювання, а також методи математичної статистики.

Основні наукові положення та їхня новизна полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості як наукове підґрунтя методології прогнозування їх значень. При цьому *уперше*:

- встановлено, що залежність швидкості обвуглювання $v(t)$ дерев'яних колон від тривалості впливу стандартного температурного режиму пожежі t описується формулою, $v(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$ та визначені коефіцієнти даної регресії для таких колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) в один, два шари та без нього;

- встановлено, що залежність межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) (y) від розмірів перерізу дерев'яної колони (x_1), товщини вогнезахисного шару (x_2) та прикладеного на дерев'яну колону навантаження (x_3) описується формулою $y = 55,625 + 40,625x_1 + 15,125x_2 - 5,625x_3 + 8,625x_1x_2 - 2,625x_1x_3 + 1,375x_2x_3 + 1,875x_1x_2x_3$;

- з урахуванням виявлених закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості, обґрунтовано та запропоновано табличний метод їх прогнозування шляхом створення довідникових таблиць з вимогами щодо необхідних геометричних параметрів, товщини облицювання, розмірів перерізу колони та механічного навантаження.

Набуло подальшого розвитку застосування розрахункових табличних методів прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним

облицюванням для визначення відповідних вихідних даних для проектування споруд з їх застосуванням.

Удосконалено науково-методичну базу забезпечення нормованої вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій з вогнезахисним облицюванням.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується результатами аналізу джерел літератури; відповідністю методів дослідження поставленим меті і задачам; застосуванням аналітичних методів досліджень; необхідним об'ємом даних отриманих під час проведення експериментальних досліджень з використанням методів випробувань, що регламентуються чинними національними стандартами, метрологічно атестованого обладнання та повірених засобів вимірювання; задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також апробацією та практичним впровадженням результатів проведених досліджень.

Практичне значення і реалізація отриманих результатів полягає у розробці табличного методу оцінювання вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) в умовах пожежі за стандартним температурним режимом, що дозволяє встановити необхідну товщину вогнезахисту в залежності від розмірів перерізу колони та рівня навантаження з метою забезпечення необхідного класу вогнестійкості. Це дозволяє знизити трудомісткість робіт порівняно з іншими методами на стадії проектування. Розроблена таблиця розмірів дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням для забезпечення заданого класу вогнестійкості може доповнити нормативну базу з оцінки вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням у вигляді плит OSB.

Розроблений табличний метод впроваджено в технологічні процеси у Випробувальній лабораторії ТОВ «Пожтест» та в навчальний процес

Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України під час викладання навчальних дисциплін «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій» та «Стійкість будівель та споруд при пожежі».

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні літературного огляду щодо стану питання вогнестійкості дерев'яних колон, формулюванні ідеї роботи, визначенні мети і завдань досліджень, об'єкту та предмету досліджень; розробці методики експериментальних досліджень та їх проведення; обробці отриманих даних, розробці способу інтерполяції температур у вузлових точках перерізу дерев'яних колон, здійсненні моделювання процесу обвуглювання на основі визначених значень критичних температур в залежності від часу вогневого впливу; розробленні таблиці з розмірами дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням для забезпечення заданого класу вогнестійкості. Участь здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, який наведено в списку опублікованих праць за темою дисертації полягає у наступному:

- В науковій праці *«Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням»* здобувач провів літературний огляд щодо впливу вогнезахисного оброблення на геометричні параметри зони обвуглювання колон, а також здійснив аналіз існуючих методів визначення вогнестійкості дерев'яних колон та вияв недоліки;

- В науковій праці *«Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі»* здобувач розробив методику експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі та науково обґрунтував її основні положення.

- В науковій праці *«Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі»* здобувач опрацював отримані дані в ході проведення експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в

умовах пожежі та виявив основні закономірності температурного відклику у поперечному перерізі колон, а також встановив зв'язок між геометричною конфігурацією зони обвуглювання та температурними показниками.

- В науковій праці *«Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой»* здобувач розробив методологію прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на всеукраїнських, міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях, а саме:

– 18 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до європейського простору» (м. Київ, 2016 р.);

– 19 Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2017 р.);

– VII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2017 р.);

– Всеукраїнській науково-практичній конференції «Пожежна безпека: проблеми та перспективи» (м. Харків, 2018 р.);

– XIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2018 р.);

– XII международной научно-практической конференции молодых ученых «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы» (г. Минск, 2018 г.);

– Міжнародній науково-технічній конференції «Технології та інфраструктура транспорту» (м. Харків, 2018 р.).

Публікації. Основний зміст роботи викладено в 5 наукових статтях, віднесених до переліку фахових, в тому числі в одній статті у виданні, що

входить до наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, Open Academic Journals Index та інших. Результати досліджень також висвітлено у 7 доповідях на вітчизняних та іноземних наукових конференціях.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 114 найменувань, містить 162 сторінки друкованого тексту, 30 таблиць, 55 рисунків, 2 додатки.

РОЗДІЛ 1 ОЦІНКА СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ТА МЕТОДІВ ЇЇ ОЦІНЮВАННЯ

1.1 Аналіз статистичних даних щодо виникнення пожеж на будівельних об'єктах

Рівень пожежної безпеки залежить від відносних показників, наприклад кількості загиблих на пожежах, що припадають на 1 тис. жителів. У розвинутих країнах з достатньо високою щільністю населення, протягом року відбувається від двох до п'яти на кожну тисячу населення. У багатьох країнах світу щорічні втрати від пожеж складають від 1 % валового національного продукту. Звідси виходить, що три робочих дні економіка цих держав працює «на пожежу». За останні десять років в середньому в Україні зареєстровано менше пожеж в 3 рази, ніж у Польщі, в 4 рази – ніж в Італії, в 6 разів – ніж у Франції та в 11 разів – ніж у Великобританії.

Проте, загибель людей на пожежах в середньому по Україні перевищує показник Великобританії, Італії, Франції та Польщі разом взятих, а кількість пожеж на 1000 чоловік населення в Україні в 3 рази менша, ніж у Польщі, в 3,5 рази –ніж в Італії, в 5 разів – ніж у Франції, в 9 разів – ніж у Великобританії.

Тому питання дослідження пожежної безпеки в державі повинно бути в пріоритеті, а особлива увага має приділятися вжиттю заходів щодо попередження виникнення пожеж з прийняттям якісних інженерних рішень, що створять передумови забезпечення пожежної безпеки на будівельних об'єктах як в глобальному так і в локальному розумінні [1].

Статистичні дані щодо виникнення пожеж в Україні [2 - 6] показують, що близько 50 % від загальної чисельності припадає на споруди. В таблиці 1.1 представлені дані щодо наслідків пожеж в спорудах за період з 2013 по 2017 роки.

З таблиці 1.1 видно, що кількість пожеж кожного року зростає, що свідчить про незадовільний рівень пожежної безпеки в державі в цілому.

Таблиця 1.1 – Дані про пожежі в спорудах за період з 2013 по 2017 рік

Показник	2013	2014	2015	2016	2017	Середнє значення
Кількість пожеж	61114	68879	79581	74221	83116	73882
Загинуло осіб	2494	2246	1947	1872	1819	2076
У тому числі дітей	73	74	66	57	65	67
Збитки прямі, тис. грн.	1489741	1489741	1458296	1626531	2038653	1620592

На основі проведеного аналізу статистичних даних за об'єктами їх виникнення встановлено, що у 2017 році у спорудах сталося 33901 пожежа (40 %), з яких 8436 (25 %) – у спорудах зведених на основі дерев'яних конструкцій, на відкритих територіях виникло 41700 пожеж (51 %), на транспорті – 4212 (5 %) пожеж. На інші об'єкти, що не ввійшли до зазначеного переліку припадає 3303 пожеж, що становить 4 % від загальної кількості. Варто зазначити, що тенденції щодо зростання згаданих пожеж спостерігаються впродовж останні 5 років. На рисунку 1.1 представлений розподіл кількості пожеж за об'єктами їх виникнення.

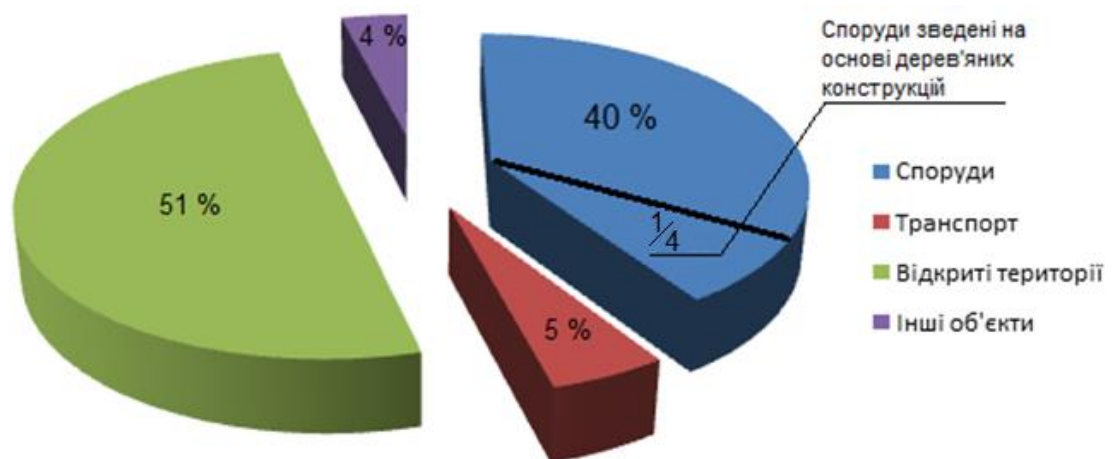


Рисунок 1.1 – Розподіл пожеж за об'єктами їх виникнення (2017 р.)

Ранжування кількості пожеж і прямих збитків, завданих ними, по спорудах різного призначення за відносними показниками наведено на рисунку 1.2 [6].

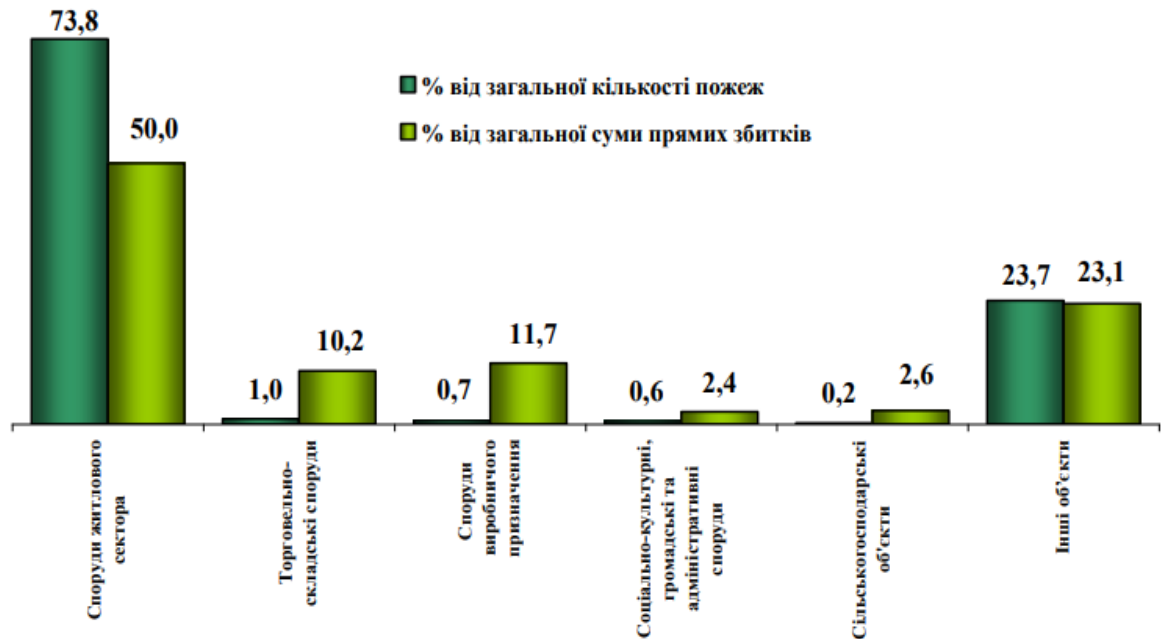


Рисунок 1.2 – Відносні показники кількості пожеж та прямих збитків на спорудах різного призначення (2017 р.)

З рисунку 1.2 чітко видно, що найбільша кількість як збитків так і пожеж припадає саме на споруди житлового сектору де постійно знаходяться люди.

Пожежна безпека споруд залежить від ряду факторів, в тому числі і вогнестійкості будівельних конструкцій. Аналіз даних про пожежі показав, що низька межа вогнестійкості конструкцій, зокрема невідповідність нормативним документам з пожежної безпеки, а особливо несучих будівельних конструкцій, суттєво зменшує час евакуації людей й значно ускладнює роботу пожежно-рятувальних підрозділів на пожежі. Це в свою чергу призводить до людських втрат та великих матеріальних збитків [7].

Широке використання дерев'яних конструкцій при будівництві будівель та споруд в нашій державі, зокрема несучих, значно знижує рівень пожежної безпеки об'єктів. У зв'язку з цим дослідження поведінки

дерев'яних конструктивних елементів в умовах пожежі залишається актуальним питанням.

1.2. Область застосування дерев'яних будівельних конструкцій, вимоги нормативних документів щодо вогнестійкості будівельних конструкцій

В сучасному будівництві деревина широко використовується як конструкційний матеріал для будівель та споруд різного призначення. У житловому будівництві - для будівництва житлових, громадських і виробничих, сільськогосподарських, тваринницьких, складських та інших будівель і споруд. У транспортній системі - при будівництві залізничних колій (застосування шпал), підвісних мостових розв'язок, спорудженні невеликих дерев'яних мостів. На Поліссі та Карпатському регіоні й досі користується популярністю будівництво дерев'яних будинків і споруд в основному в сільській місцевості. Для несучих конструкцій будівель використовують колоди круглого перерізу або механічно оброблені з плоскою формою.

При будівництві дерев'яних будинків і споруд виділяють дві основні конструктивні системи з різними функціями використовуваних дерев'яних конструкцій:

1 – без каркасні споруди із застосуванням масивних колод або бруса, виконують одночасно несучі та огорожувальні функції конструкцій зовнішніх стін. Стіни сприймають всі вертикальні та горизонтальні навантаження через перекриття в будинку;

2 – будівлі каркасного типу, в яких всі основні навантаження сприймають конструкції каркаса. Цей тип будівель можна поділити на будівлі з великопролітними масивними несучими конструкціями і будівлі з полегшеними несучими та огорожувальними конструкціями.

В каркасній конструктивній системі несучими вертикальними конструкціями є колони, горизонтальними несучими конструкціями служать ригелі, балки, ферми [8].

Однією з умов необхідних для виконання дерев'яними конструкціями несучих та огорожувальних функцій є забезпечення необхідної нормативної вогнестійкості [9 - 11]. Як правило, вогнестійкість дерев'яних конструкцій залежить не тільки від типу матеріалу клеєна чи цільна деревина, але й від таких факторів як: наявності вузлів з'єднання, елементів посилення, геометричних розмірів і конфігурації перерізу конструкції, величини механічних навантажень, наявного вогнезахисту, умов вогневого впливу [7].

Взагалі будівлі та споруди всіх типів класифікують за ступенем вогнестійкості та класом пожежної небезпеки. За ступенем вогнестійкості будівлі поділяють на: I, II, III, IIIa, IIIб, IV, IVa, V ступеня вогнестійкості [12].

Показником вогнестійкості будівельної конструкції є межа вогнестійкості, що визначається часом у хвилинах від початку вогневого випробування до настання одного чи декількох нормованих для даної конструкції ознак (R, E або I). Межа вогнестійкості конструкцій з деревини як правило зазвичай визначається часом за який несуча здатність перерізу зменшиться за рахунок обвуглювання і прогріву до величини діючого навантаження.

Основними ознаками граничного стану несучих і огорожуючих конструкцій [13] є:

- граничний стан за ознакою втрати несучої здатності (R): настає внаслідок обвалення зразка або виникнення граничних деформацій (наприклад недопустимого вигину);
- граничний стан за ознакою втрати цілісності (E): виникнення в конструкціях або стиках наскрізних тріщин або наскрізних отворів, через які в суміжне приміщення проникають продукти горіння або полум'я;

- граничний стан за ознакою втрати теплоізолювальної здатності: перевищення середньої температури на не обігріваній поверхні зразка над початковою середньою температурою цієї поверхні на 140 °С або перевищення температури в будь-якій точці не обігріваній поверхні зразка над початковою температурою в цій точці на 180 °С.

На сьогоднішній день існують наукові праці присвячені питанням вогнестійкості дерев'яних несучих конструктивних елементів, зокрема Поздєєва С.В., Змаги Я.В., Демешка В.В., Демчини Б.Г., Макішева Ж.К та ін., [14 - 16] однак й досі залишаються не повністю досліджені питання з вогнестійкості дерев'яних колон. Виходячи з цього, здійснено аналіз нормування вогнестійкості дерев'яних колон в тих спорудах [17 - 25], де виникає найбільше пожеж згідно статистичних даних. Результати аналізу державних будівельних норм представлено у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.2 – Нормування вогнестійкості колон в спорудах

№	Тип споруди	Ступінь вогнестійкості							
		I	II	III	IIIa	IIIб	IV	IVa	V
1	Житлові будинки	150	120	120	15	60	30	15	-
2	Торгівельно-складські споруди	150	120	120	15	60	30	15	
3	Культурно-видовищні та дозвіллієві заклади	150	120	120	15	60	30	15	
4	Дитячі дошкільні заклади	150	120	120	15	60	30	15	
5	Будинки та споруди навчальних закладів	150	120	120	15	60	30	15	
6	Заклади охорони здоров'я	150	120	120	15	60	30	15	
7	Підприємства харчування	150	120	120	15	60	30	15	
8	Спортивні та фізкультурно-оздоровчі споруди	150	120	120	15	60	30	15	
9	Адміністративні будинки	150	120	120	15	60	30	15	

Державні будівельні норми вимагають забезпечення необхідних мінімальних класів вогнестійкості будівельних конструкцій в залежності від ступеня вогнестійкості будинків, однак не забороняють використання таких конструкцій. З метою підвищення межі вогнестійкості деревини й доведення до нормованого класу застосовують багато способів вогнезахисту, в тому числі – вогнезахисне облицювання.

Однак, на сьогодні не існує методу визначення межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в чинній нормативній базі.

На даний час існує багато способів здійснення вогнезахисту дерев'яних конструкцій, однак вони неодноразово досліджувалися різними вченими. Постає питання вибору нового, принципово нестандартного способу вогнезахисту дерев'яних конструкцій, який зміг би конкурувати або хоча би бути на рівні з існуючими способами вогнезахисту.

1.3. Способи вогнезахисту дерев'яних конструкцій

Всі засоби вогнезахисту дерева за принципом дії діляться на активні і пасивні.

Активні засоби захисту можуть самі впливати на процес горіння, а саме:

- ускладнювати доступ повітря до нагріваючої поверхні;
- зменшити виділення з деревини горючих речовин;
- знизити температуру горіння;
- сприяють виділенню негорючих газів (водяної пари, SO_2 , HCl , NH_3).

До них відносять системи димовидалення, водяні завіси, системи пожежогасіння.

Пасивні засоби захисту утворюють певний ізоляційний шар, що захищає дерево від доступу тепла. Основними функціями яких є:

- збереження протягом заданого відрізка часу теплофізичних та міцнісних характеристик незважаючи на високі температури;

- утворення різних пористих структур з яскраво вираженими ізоляційними здібностями.

До них відносять вогнезахисні фарби та облицювання.

В Україні згідно правил з вогнезахисту [26] існують такі способи вогнезахисту будівельних конструкцій:

- поверхневе просочування;
- поверхневе вогнезахисне оброблення;
- вогнезахисне заповнення.

Вогнезахисне просочування та оброблення широко застосовуються для захисту дерев'яних конструкцій, розглянемо їх більш детально [7].

Вогнезахисне просочування використовується для будівельних конструкцій, виготовлених з пористих матеріалів якою являється деревина. При просочуванні використовують вогнезахисні засоби, які проникають в об'єкт вогнезахисту. У залежності від глибини проникнення виділяють два способи просочення: поверхневе (до 5 мм) та глибоке (5 мм і більше) [7]. Глибоке – використовується тільки для захисту деревини способами визначеними ГОСТ 20022.6-93 «Защита древесины. Способы пропитки». Однак на сьогоднішній день питання вогнезахисту дерев'яних конструкцій із застосуванням просочень вивчалися різними дослідниками. З року в рік вогнезахисні просочення вдосконалюються, хімічний склад яких ускладнюється, час захисної дії зростає, значно підвищуючи собівартість. Як показує практика, час захисної дії просочень нанесених у поверхневий спосіб не дозволяє отримати бажаних результатів і має певні недоліки. Що стосується глибокого просочення, то воно більш ефективне й дійсно підвищує вогнестійкість дерев'яних конструкцій. Основні способи його здійснення: вимочування, дифузійне просочування, просочування в гарячих-холодних ваннах, просочування під тиском в автоклавах та ін. Однак проведення операцій по глибокому просочуванню значно ускладнено, адже для цього необхідно спеціальне обладнання, обмеженість в розмірах

дерев'яних конструкцій та висока собівартість. Це все на практиці значно обмежує коло використання даного методу [7].

При поверхневому оброблянні застосовуються вогнезахисні засоби, які на поверхні об'єкта вогнезахисту утворюють вогнезахисний покрив. Вогнезахисні засоби наносяться методом фарбування (фарби, лаки), штукатурення, обмотування (рулонні вогнезахисні засоби), облицювання (плитні матеріали) [7]. Обираючи який саме вогнезахисний покрив нанести слід враховувати [27 - 30]:

- вимоги до межі вогнестійкості конструкції згідно норм;
- тип деревини;
- умови експлуатації;
- розміри конструкції;
- очікуваний час вогнезахисту;
- вплив на міцнісні характеристики;
- ефективність захисту;
- економічну доцільність.

Будівельні конструкції з деревини мають високий показник горючості. При проектуванні будівель згідно [12] при використанні дерев'яних конструктивних елементів повинен бути забезпечений нормований клас вогнестійкості. Для цього такі конструкції захищають від дії вогню та високих температур, вогнезахисними просоченнями та фарбами [31 - 32], штукатуркою або іншими листовими чи плитними матеріалами. Тому одним із способів зниження горючості деревини є її облицювання.

Взагалі, чим товще конструкція, тим тяжче її прогріти на необхідну глибину для виникнення стійкого горіння і розповсюдження полум'я. Тому збільшення площі перерізу дерев'яних конструкцій може бути одним із варіантів вогнезахисту та підвищення межі вогнестійкості [7, 33].

Доцільно зазначити переваги та недоліки застосування облицювань з плитних матеріалів у вигляді таблиці 1.3 [34].

Таблиця 1.3 – Переваги та недоліки облицювання з плитних матеріалів

Спосіб вогнезахисту	Переваги	Недоліки	Область застосування
Встановлення плитних матеріалів	- низький рівень маси; - підвищена вібростійкість та довговічність за рахунок механічного кріплення до конструкції; - технологічність і відносно низька трудомісткість; - ремонтпридатність; - не залежить від стану раніше нанесених лакофарбових покриттів; - гарні декоративні властивості	- високий рівень необхідних товщин вогнезахисту; - неможливість захисту важкодоступних місць конструкції; - високий рівень паропроникненості; - перевитрата матеріалу при забезпечення високого класу вогнестійкості	Для забезпечення високої межі вогнестійкості конструкцій при наявності плоских поверхонь

Як бачимо з таблиці облицювання будівельних конструкцій плитами має обмежену сферу застосування та має свій ряд недоліків, проте незважаючи на це чи не основною перевагою способу є довговічність вогнезахисту, простота нанесення та можливість за допомогою збільшення слоїв регулювати межу вогнестійкості конструкцій [7].

В якості конструктивних покриттів для дерев'яних конструкцій можуть бути використані азбестоцементні листи, гіпсокартон, або інші негорючі або важкогорючі матеріали [7].

Незалежно від способу вогнезахисту дерев'яних конструкцій, особливо тих, що виконують функції несучих є використання їх в сухому стані. Адже чи не основним показником деревини являється міцність. Міцність зростає в міру висихання деревини, при цьому граничним значенням є точка насичення волокна. Наприклад, у дугласової ялиці міцність на стиск уздовж волокон при вологості 12 % в два рази вище, ніж при – 25 %. Однак, аналіз наукових праць [35, 36] показав, що чим вищий показник вологості в деревині тим менша швидкість її обвуглювання, адже

витрачається більше енергії на перетворення вологи в пару, при цьому температура в деревині повільно зростає. Незважаючи на це вміст вологості не може перевищувати 25 %. Для того щоб нагріти 1 кг деревини до температури самозаймання (270 °C) з початковою вологістю 20, 30, 40 % слід затратити теплоти відповідно в 1,73; 2,09; 2,45 рази більше, ніж для абсолютно сухої деревини [35, 36]. Згідно Єврокоду 5 для деревини 1 класу експлуатації середній вміст вологи, як правило в м'яких породах деревини не повинен перевищувати 12 %, для деревини 2 класу експлуатації – не повинен перевищувати 20 %.

1.4. Пожежна небезпека і поведінка дерев'яних конструкцій в умовах пожеж

Деревина являється пожежонебезпечним матеріалом, що включає в себе сукупність пожежонебезпечних показників Г4, В3, Д3, Т4 [37].

Пожежну небезпеку деревини можна охарактеризувати наступними параметрами. Температура займання і самозаймання деревини становлять 250 і 350 ° C відповідно. Лінійна швидкість поширення полум'я по поверхні становить 1-10 мм/с. Ця величина істотно залежить від щільності зовнішнього теплового потоку, що падає на деревину, від породи деревини і від орієнтації зразка матеріалу в просторі.

При пожежі згоряння дерева і відповідно обвалення несучих елементів, фізично відбувається наступним чином. Процес горіння дерева полягає в обвуглюванні частини несучого діаметра конструкції, обвуглена частина руйнується, і все навантаження поступово переходить на ту частину конструкції, що залишилася необвугленою. Якщо процес горіння продовжується тривалий час, то відбувається зменшення несучої площі поперечного перерізу і за законами фізичних процесів, пропорційно збільшується навантаження на опорну площу, що поступово зменшується.

Граничний стан за втратою несучої здатності настає в момент, коли напруження в робочому перерізі стають рівними з нормативними [38 - 43].

Деревина чутлива до нагрівання [44]. Вже при температурі матеріалу близько 110°C починається її терморозклад, що можна розділити на кілька характерних стадій. При нагріванні до $120\text{-}180^{\circ}\text{C}$ відбувається видалення вільної і потім починається виділення хімічно зв'язаної води, розкладання найменш термічно стійких компонентів деревини в основному з виділенням CO_2 і H_2O . При температурі 250°C починається піроліз деревини (в основному геміцелюлози) з виділенням CO , CH_4 , H_2 , CO_2 , H_2O і т.п. Газова суміш, що утворилася здатна до займання від джерела запалювання. При температурі $280 - 300^{\circ}\text{C}$ процес терморозкладу деревини інтенсифікується. Лігнін розкладається лише при досягненні $350 - 450^{\circ}\text{C}$. При $350\text{-}450^{\circ}\text{C}$ триває піроліз деревини і виділяється основна маса горючих газів – 40% від можливої кількості. Виділяється газоподібна суміш складається з $25\% \text{H}_2$ і 40% граничних і ненасичених вуглеводнів. При досягненні достатньої концентрації газоподібних горючих продуктів терморозкладу можливо їх самозаймання.

Процес горіння деревини протікає в дві стадії: полуменеве горіння продуктів терморозкладу деревини і тління вугільного залишку, що залишився. Тління відбувається в результаті гетерогенної реакції вугільного залишку з газоподібним киснем повітря. В умовах пожежі до 60% тепла виділяється в період полуменевого горіння деревини і близько 40% - в період горіння вугілля. У зв'язку з цим період полуменевого горіння є визначальним, хоча займає більш короткий проміжок часу, ніж фаза тління [45].

Крім того, поведінка конструкцій в умовах горіння залежить від їх зовнішньої форми. Чим більше поверхня при однаковому об'ємі, тим нижче вогнестійкість. Цільна деревина має великі тріщини при висиханні, що негативно позначається на її вогнестійкості. Вогнестійкість клеєних дощок, у яких немає тріщин, вище, і її можна точніше визначити, чим вогнестійкість елементів з цільної деревини [46-49].

Похідні матеріали з деревини мають подібні до неї властивості. Для прикладу слід навести коротку характеристику деревинностружкових плит з орієнтованою стружкою (OSB\3). Плити OSB\3 являються горючими. Їм присвоєно клас горючості – Г4, займистості – В3, димоутворення – Д3, розповсюдження полум'я – РП3. Проте, не зважаючи на це, OSB\3 здатні витримувати дію відкритого полум'я і не займатися при цьому деякий час. При горінні плит спостерігається синє полум'я, відбувається обуглення верхніх шарів, що здатне на деякий час стримувати розповсюдження теплоти на поверхню, що не обогрівається.

1.5. Аналіз існуючих методів оцінки вогнестійкості дерев'яних колон

Огляд нормативних документів та літературних джерел показав, що для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій існують такі методи: експериментальний, розрахунковий та експериментально-розрахункові методи.

1.5.1. Експериментальне визначення вогнестійкості будівельних конструкцій

Експериментальне визначення вогнестійкості здійснюється відповідно до основоположного стандарту [13] та його похідних [50 – 52] де враховуються більш конкретно особливості будівельних конструкцій та умови їх роботи у складі будівлі.

Сутність методу випробувань з визначення межі вогнестійкості конструкцій полягає у визначенні часу від початку вогневої дії до настання одного з нормованих для даної конструкції граничних станів з вогнестійкості в умовах, що регламентуються стандартом [13]. Основний принцип, який покладено у експериментальний метод випробування на вогнестійкість, полягає у створенні у спеціальній випробувальній печі (рисунок 1.3) умов випробувань, якнайбільше наближених до реальних умов розвитку пожежі у

приміщенні. У той самий час, для отримання повторюваних та відтворюваних результатів випробувань – значень межі вогнестійкості конструкції, ці умови мають бути регламентовані та їх характеристики конкретизовані у певному діапазоні допустимих значень, які мають контролюватися із заданою точністю. Відхилення від границі допустимих значень при проведенні випробувань може призвести до спотворення результатів [53 – 56].

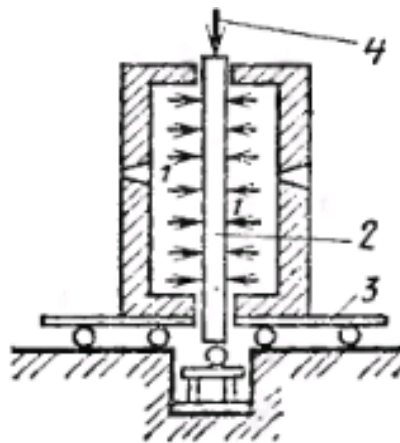


Рисунок 1.3 – Схема вогневої печі, де 1 – вогнева камера, 2 – експериментальний зразок, 3 – візок, 4 – навантаження

Результати отримані при проведенні експерименту є досить достовірними, враховують всі процеси та технології й найбільш реально показують вогнестійкість конструкції. Та не зважаючи на це, процедури випробувань досить трудомісткі, потребують багато часу та фінансових затрат. Варто зазначити, що експериментальні методи найбільш точні з існуючих методів оцінки вогнестійкості, однак не завжди можуть бути застосовані на практиці.

1.5.2 Розрахункові методи

Обмеження сфери застосування експериментальних методів для визначення межі вогнестійкості будівельних конструкцій призвело до розвитку розрахункових методів.

Розрахункові методи дозволяють здійснювати оцінку межі будівельних конструкцій за допомогою математичного описання. Такі методи є досить гнучкими, дозволяють враховувати граничні умови, геометричні розміри, середовище, де знаходиться конструктивний елемент та ін., чи не найголовніше, при застосуванні таких методів значно економляться час та фінансові затрати. Однак недоліком таких методів є невисока точність, не завжди можна врахувати всі умови, в яких перебуває будівельна конструкція при використанні таких методів.

На сьогодні існує система будівельних стандартів (Єврокодів) [57, 58], в яких можна виділити наступні підходи для проведення розрахунків:

1. За обраними температурними режимами виділяють:
 - номінальні – залежності відповідно до ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2, до них відносяться:
 - стандартний температурний режим;
 - температурний режим зовнішньої пожежі;
 - температурний режим вуглеводневої пожежі;
 - параметричні - залежності на базі моделей пожежі та спеціальних фізичних параметрів, що виражають стан середовища в приміщенні в умовах пожежі.
2. В залежності від прийнятої розрахункової моделі:
 - аналіз окремої конструкції;
 - аналіз частини конструктивної системи;
 - аналіз всієї конструктивної системи.
3. В залежності від цього використовують [7]:
 - розрахунковий табличний метод;
 - спрощені методи розрахунку;
 - уточнені методи розрахунку.

Табличний метод дозволяє здійснювати оцінку вогнестійкості конструкцій на підставі даних з таблиць. В таблицях знаходяться дані на емпіричній основі, що підтверджені випробуваннями та теорією.

Спрощений метод розрахунку дає можливість здійснити аналіз окремих елементів конструкції, що працюють на розтяг, згин, стиск та ін. [7]

Уточнені методи з рахунку мають забезпечувати реалістичний аналіз всього каркасу, що підданий вогневому впливу. Як правило, ці методи ґрунтуються на основній фізичній поведінці таким чином, щоб забезпечувати прийнятний рівень наближення до очікуваної поведінки відповідного конструктивного елемента в умовах пожежі.

В уточнених методах розрахунку включаються конкретні розрахункові моделі, що визначають: збільшення та розподілу температури всередині конструктивних елементів (температурний розрахунок); механічної поведінки конструктивної системи або будь-якої її частини (міцнісний розрахунок), визначення глибини обвуглювання [7].

Наявність спеціальних програмних комплексів дає можливість створення розрахункових моделей уточненого методу розрахунку, що складаються: з рівнянь тепломасообміну, напружено-деформованого стану, рівнянь, що визначають початкові та граничні умови та коефіцієнтів цих рівнянь. Для програмування уточнених моделей використовуються програмні комплекси ANSYS, Ліра, Femap [7].

Проведення математичного моделювання теплових процесів оцінювання вогнестійкості конструкцій здійснюється шляхом розв'язання теплотехнічних та міцнісних задач.

Рівняння теплопровідності в умовах пожежі розв'язують двома способами [7]:

1. Розв'язок задачі теплопровідності з граничними умовами III роду. На поверхні будівельної конструкції, яка обігрівається, задають радіаційний і конвективний теплообмін. Температура середовища задається стандартною температурною кривою, або за даними розрахунку реального пожежного навантаження;

2. Розв'язання спряженої задачі. Рівняння теплопровідності для конструкції і рівняння динаміки зміни температури газового середовища (рівняння розвитку пожежі) вирішуються спільно.

Розрахунки за допомогою математичних моделей дозволяють враховувати ряд понижувальних коефіцієнтів для властивостей матеріалів, однак при цьому не враховуються такі фактори як: фізична і геометрична не лінійність, усадка, повзучість, діаграми розтяг-стиск.

Значним недоліком, що впливає на точність оцінки межі вогнестійкості при використанні уточнених моделей розрахунку є те, що не враховується вогнезахист конструкцій, вплив вогнезахисту на теплофізичні та механічні властивості деревини. Взагалі, в уточнених моделях на досить низькому рівні розглядаються геометричні конфігурації зони обуглювання деревини [7].

В існуючих розрахункових методах застосовується схема по розрахунку вогнестійкості дерев'яних конструкцій рисунку 1.4 [56].

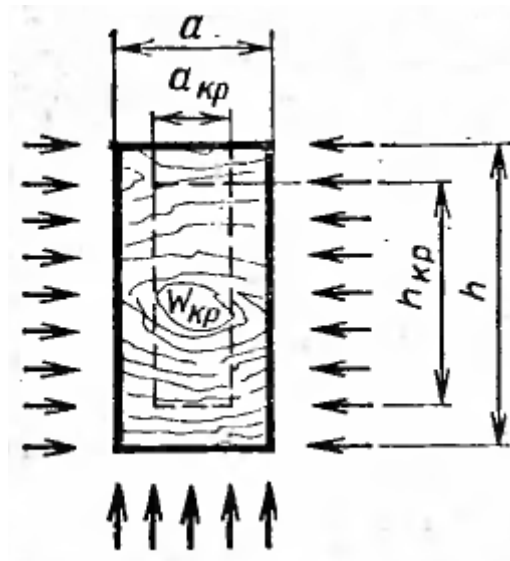


Рисунок 1.4 – Схема дерев'яної колони

Сутність розрахунку зводиться до визначення часу, за який при певній швидкості обуглювання деревини конструкції, площа перерізу елемента зменшиться до критичної позначки. Внаслідок цього напруження в дерев'яних конструктивних елементах зростає і при досягненні опору

прийнятого для розрахунку вогнестійкості R^0 наступає втрата несучої здатності.

При здійсненні розрахунку за представленою схемою визначається площа критичного перерізу $F_{кр}$ розмірів цього перерізу ($b_{кр}, h_{кр}$) і критичної глибини обвуглення $\delta_{кр}$, знаючи швидкість обвуглення знаходять час, після закінчення якого наступає втрата несучої здатності ($t = v : \delta_{кр}$). В зв'язку з деформацією форми перерізу конструктивного елемента при пожежі створюються певні труднощі по визначенні часу, після закінчення якого розміри перерізу і глибина обвуглення $\delta_{кр}$ досягають критичних значень. В зв'язку з цим пропонується рішення задачі по визначенні межі вогнестійкості дерев'яних конструкцій методом послідовних наближень.

Умови безпеки виконані, якщо дотримується нерівність:

$$\sigma_t = \Pi_{mp} \leq R_0, \quad (1.1)$$

де $\sigma_t = \Pi_{mp}$ – напруження в конструкції при тривалості дії високих температур на пожежі, рівній вимагаємій межі вогнестійкості.

Однак в представленій схемі розрахунку не враховуються ряд факторів, що впливають на точність оцінювання вогнестійкості. Зокрема не враховується вплив наявного вогнезахисту на процеси обвуглення деревини.

В Єврокодi 5 [56] представлена дещо інша методика визначення межі вогнестійкості, розглянемо її.

1. Знаходяться розрахункові показники механічних властивостей матеріалів та їх опору.

2. Знаходиться розрахункове значення несучої здатності за формулою:

$$R_{d,t,\hat{f}} = \eta \frac{R}{\gamma_{M,\hat{f}}}, \quad (1.2)$$

де $R_{d,t,fi}$ – розрахункове значення несучої здатності при пожежі в конкретний момент часу t ; R – значення несучої здатності за нормальної температури, що не враховує вплив тривалості вантаження та вологості (коефіцієнт вологості $k_{mod}=1$); η – коефіцієнт перетворення для зниження несучої здатності при пожежі; $\gamma_{M,fi}$ – коефіцієнт надійності деревини при пожежі.

3. Визначаються міцність та жорсткість за формулами:

$$f = k_{fi} f_k, \quad (1.3)$$

$$S_i = k_{fi} S, \quad (1.4)$$

де f – міцнісна характеристика за нормальної температури; S_i – розрахункова жорсткості (модуль зсуву або модуль пружності) при пожежі; S – характеристика жорсткості при нормальній температурі; f_k – нормативне значення міцності; k_{fi} – коефіцієнт визначення міцності згідно таблиці 1.4

Таблиця 1.4 – Значення коефіцієнту міцності

Матеріал	k_{fi}
Цільна деревина	1,25
Клеєна деревина	1,15
Плити на основі деревини	1,15
LVL	1,1

4. Виконується розрахунок навантаження на конструкцію.

Навантаження визначається для перевірки умови міцності за необхідної часу вогневого впливу t :

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}, \quad (1.5)$$

де $E_{d,fi}$ – розрахунковий ефект впливів при пожежі; $R_{d,t,fi}$ – розрахунковий показник несучої здатності при пожежі в момент часу t .

Ефект впливів $E_{d,fi}$, як спрощення, отримується з розрахунку конструкції при нормальній температурі:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d, \quad (1.6)$$

де E_d – зусилля від впливів за нормальної температури; η_{fi} – коефіцієнт послаблення для розрахункових навантажень в умовах пожежі.

Визначається коефіцієнт послаблення η_{fi} для комбінації навантажень:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}, \quad (1.7)$$

де $Q_{k,1}$ – змінне навантаження; G_k – постійне навантаження; γ_G – частковий коефіцієнт постійного навантаження; $\gamma_{Q,1}$ – частковий коефіцієнт змінного навантаження; ψ_{fi} – коефіцієнт поєднання для частоти значень змінних навантажень при умовах пожежі.

5. Проводиться розрахунок на несучу здатність конструкцій.

Ефективний поперечний це різниця початкового поперечного перерізу і робочої глибини обвуглювання d_{ef} (рисунок 1.5 [58]).

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0, \quad (1.8)$$

де $d_0 = 7$ мм; $d_{char,n}$ – умовна розрахункова глибина обвуглювання; k_0 – припускається, що матеріал біля лінії обвуглювання елемента в шарі

товщиною $k_0 d_0$ має нульову міцність і жорсткість, при цьому міцність та жорсткість залишкового поперечного перерізу залишаються незмінними.

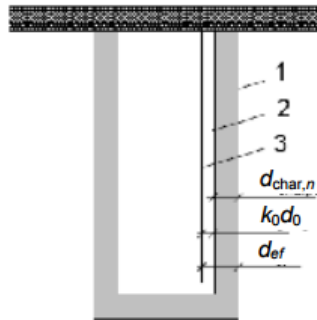


Рисунок 1.5 – Визначення залишкового і ефективного поперечного перерізу: 1 – поверхня елемента на початку; 2 – лінія площі залишкового перерізу; 3 – лінія площі ефективного перерізу

Швидкість обвуглювання незахищеної м'якої деревини визначається з співвідношення між швидкістю обвуглювання β і часом t .

Швидкість обвуглювання β_{par} під час фази нагрівання за параметричним впливом пожежі представлена виразом:

$$\beta_{par} = 1,5 \beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08}, \quad (1.9)$$

де основні параметри знаходяться за формулами:

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2}, \quad (1.10)$$

$$O = \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h_{eq}}, \quad (1.11)$$

$$b = \sqrt{pc\lambda}, \quad (1.12)$$

$$h_{eq} = \sum \frac{A_i h_i}{A}, \quad (1.13)$$

де O – коефіцієнт розкриття отворів, $m^{0,5}$; β_n – умовна розрахункова швидкість обвуглювання, $mm/xv.$; A_v – загальна площа вертикальних прорізів протипожежного відсіку, m^2 ; A_t – загальна площа підлоги, стін, стелі (огороджуючи конструкцій) в пожежному відсіку, m^2 ; A_i – площа i -го вертикального прорізу, m^2 ; h_{eq} – середня висота всіх вертикальних отворів, m ; h_i – висота вертикального розкриття « i -го шару незахищеної деревини», m ; Γ – коефіцієнт, що враховує теплові властивості поверхонь розподілу відсіку; b – поглинальна здатність огороджуючої конструкції; λ – теплопровідність, $Вт/мК$; p – щільність, $кг/м^3$; c – теплоємність, $Дж/кгК$.

Представлені методи оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій мають свої особливості. Варто зазначити метод розрахунку представлений в Єврокоді 5 більш точніший, ніж викладений майже півстоліття тому Ройтманом М.Я. оскільки враховує ряд коефіцієнтів. Однак, значним його недоліком є відсутність довідникових таблиць даних, що необхідні для проектування вогнезахисту дерев'яних конструкцій. Це унеможливило використання розрахункового табличного методу для оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій при використанні плитного вогнезахисту.

1.5.3 Експериментально-розрахункові методи

Сутність експериментально-розрахункових методів полягає в проведенні випробувань зразків на вогнестійкість, використовуючи спеціальне обладнання, визначенні властивостей матеріалу з якого виготовлений зразок на основі випробувань і розрахунку вогнестійкості [7]. Розрахунок, як правило, проводиться шляхом математичного моделювання на основі даних отриманих при проведенні експерименту. Цей метод дає можливість досить точно оцінити вогнестійкість конструкцій в умовах сценаріїв як умовної та і реальної пожежі [59 - 61].

1.6 Ідея роботи, мета та задачі досліджень

Викладене вище дало підставу для визначення ідеї роботи, яка полягає у створенні передумов забезпечення нормованої вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням шляхом застосування методології прогнозування меж їх вогнестійкості, яка враховує закономірності впливу конструктивних параметрів, а також навантаження таких колон за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Мета роботи – розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості як наукове підґрунтя методології прогнозування їх значень.

Для досягнення поставленої мети визначено до розв'язку наступні задачі досліджень:

- провести аналіз статистики пожеж, сучасного стану забезпечення вогнестійкості дерев'яних колон, методів їх оцінювання та виявити шляхи їх удосконалення;
- розробити методику та провести експериментальні дослідження з виявлення залежності швидкості обуглювання дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) та без нього від часу вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі;
- розробити методику інтерполяції розподілу температур в перерізі дерев'яних колон, визначити з її застосуванням відповідні температурні поля та перевірити адекватність результатів інтерполяції;
- розробити методику математичного описування зони обуглювання дерев'яних колон з різними шарами вогнезахисного облицювання плитами типу OSB за впливу стандартного температурного режиму пожежі;
- розробити розрахункову методику та з її застосуванням виявити залежності межі вогнестійкості дерев'яної колони з вогнезахисним

облицюванням плитами типу OSB від розмірів перерізу дерев'яної колони, товщини плит та прикладеного навантаження;

– розробити розрахунковий табличний метод для оцінювання вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB).

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Випробувальне обладнання

Обладнання для проведення випробувань включає в себе спеціальну випробувальну піч за стандартним температурним режимом.

2.1.1. Обладнання та матеріали для виготовлення досліджуваних зразків

Для виготовлення зразків обрано 3 суцільних соснових бруса розміром 200×200×4500 мм, 3 плити OSB розмірами 2500×1250×10 мм, 576 саморізів розміром 3,5×30 мм, 288 саморізів розміром 3,5×60 мм, циркулярний станок, шуруповерт, дріль, свердло 7×150 мм, сушильна камера, олівець, лінійка.

2.1.2. Обладнання для проведення експериментальних досліджень

Для проведення вивчення впливу облицювання на вогнестійкість деревини слід використати таке обладнання:

- випробувальна вогнева піч основні параметри якої зазначені в таблиці 2.1;
- хромель-алюмелеві термопари ТХА, діаметр 0,7 мм; 1,2 мм;
- інформаційно-вимірювальна система «Термоконт»;
- дерев'яні зразки колон розміром 200×200×750 мм.

Таблиця 2.1 – Випробувальна вогнева піч

Технічні характеристики	Значення
Об'єм вогневої камери	$(0,524 \pm 0,100) \text{ м}^3$
Діапазон робочих температур камери	Від 0 до 1200 °С
Надлишковий тиск у камері	$(10 \pm 2) \text{ Па}$
Розміри вогневої камери:	
- глибина	850±10 мм
- ширина	650±10 мм
- висота	950±10 мм
Розміри горизонтального та вертикального прорізів	730±10×650±10 мм

Вогнева піч повинна відповідати паспорту та забезпечувати стандартний температурний режим згідно ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Функціональна схема вогневої печі представлена на рисунку 2.1.

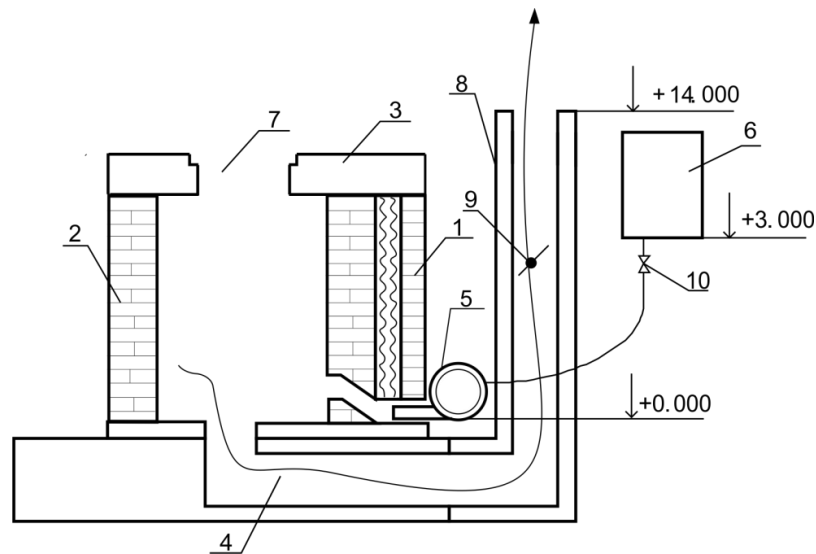


Рисунок 2.1 – Функціональна схема вогневої печі: 1, 2- огорожувальні конструкції; 3 – горизонтальна з’ємна кришка; 4 – димовий канал; 5 – форсунка; 6 – бак з дизельним паливом; 7 – вогнева камера; 8 – димохід; 9 – заслінка примусового газовідводу; 10 – вентиль

Під час роботи печі дизельне паливо подається з бака 6 до форсунки 5. Температури у вогневій камері 7 регулюється об’ємом горючої повітряно-паливної суміші за допомогою вентиля 10. Продукти горіння видаляються через димовий канал 4 та димохід 8. Витік продуктів горіння регулюється заслінкою примусового газовідводу 9. Для нагрівання печі використовується дизельне пальне.

Досліди планується виконувати з використанням печі Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту. Піч призначена для проведення випробувань на вогнестійкість фрагментів будівельних конструкцій, кабельних проходок та випробувань по перевірці вогнезахисної здатності покриттів будівельних металевих конструкцій у стандартному температурному режимі відповідно до стандарту ДСТУ Б В. 1.1-4-98*

«Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги» [13].

Конструктивна схема печі представлена на рисунку. 2.2.

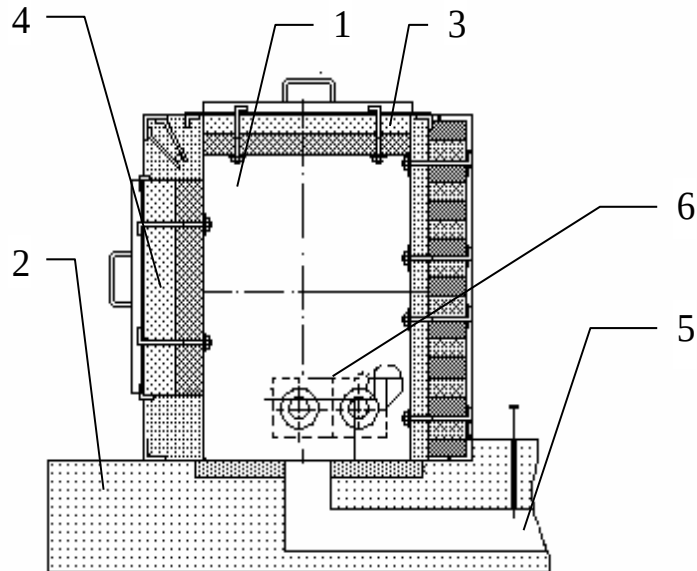


Рисунок 2.2 – Випробувальна вогнева піч УкрНДІЦЗ: 1 – вогнева камера; 2 – бетонна основа; 3,4 – теплоізоляційні кришки; 5 – канал виходу продуктів згорання; 6 – пальники

Піч виконана з металевого корпусу, що розташований на бетонній основі 2, яка має канал для виходу продуктів згорання.

Вогнева камера 1 футерована плитами з матеріалу, що виготовлений на основі кремнеземистого волокна (ПТКВ-220) та одного ряду вогнетривких цеглин. Товщина футеровки з ПТКВ-220 – 60 мм. Теплова інерція футеровки за температури 500 °C – $230 \text{ Ws}^{0.5} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Проведення випробування має здійснюватись у *вертикальному* положенні за умов дії стандартної температури на печі УкрНДІЦЗ. Переріз печі та схема із встановленими для проведення випробування дерев'яними зразками представлені на рисунку 2.3.

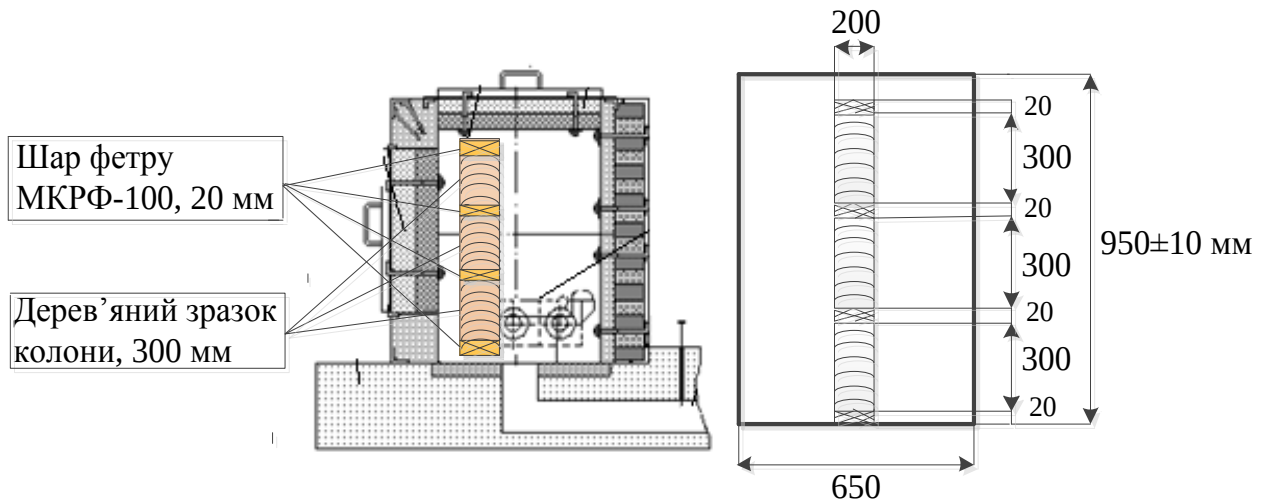


Рисунок 2.3 – Схема розташування зразків з ізоляцією торців в печі

Вимірювання та реєстрація температури в печі здійснюється вимірювально-інформаційною системою «Термоконт» з вимірювальним модулем типу «ADAM-508» та п'ятьма термоелектричними перетворювачами (далі термопари) типу ТХА (ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94)). Діаметр дроту термопар 1,2 мм. Захисний кожух термопар видалено (відрізано і знято) на довжині $35 \text{ мм} \pm 5 \text{ мм}$ від вимірювального спаю термопар. Вимірювання та реєстрація температури повинна здійснюватися з інтервалом 60 с.

Вимірювання температури в зразках слід здійснити за допомогою десяти термопар діаметром 0,7; 1,2 мм розташованих в перерізі по середині висоти зразків підключених до вимірювально-інформаційної системи «Термоконт».

Схеми розташування термопар у печі та досліджуваних зразках зображено на рисунку. 2.4.

Засоби вимірювальної техніки, що мають використовуватись під час проведення випробувань представлені в таблиці 2.2. Можуть бути використані аналогічні засоби вимірювальної техніки з метрологічними характеристиками не гіршими ніж вказаними в таблиці 2.2.

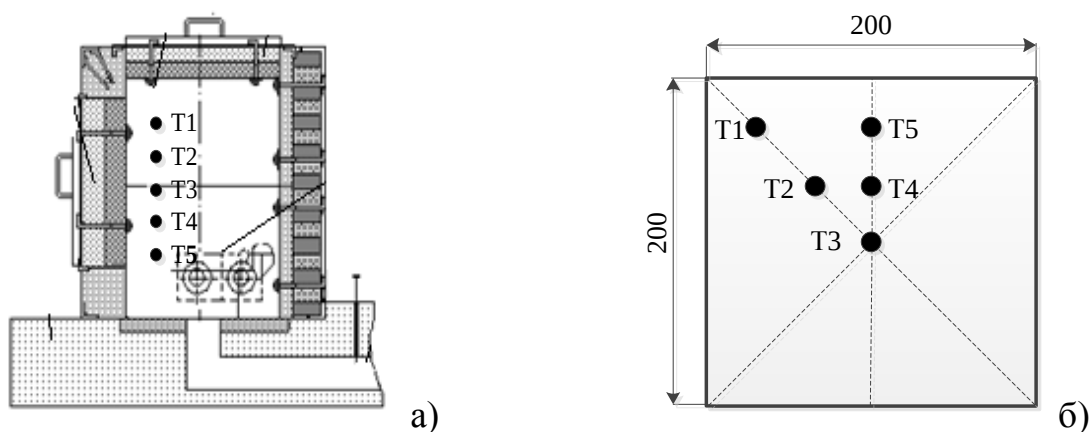


Рисунок 2.4 – Розташування термопар у печі а) та досліджуваних зразках б)

Таблиця 2.2 – Засоби виміральної техніки

Найменування і тип засобу вимірювання	Діапазон вимірювання	Клас точності, похибка засобу виміральної техніки
1	2	3
Інформаційно-вимірвальна система «Термоконт»	Від 0 °С до 1200 °С	0,6 %
Термопари ТХА	Від 0 °С до 1200 °С	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ $\pm 0,0075 T_{\text{вим}}$
Психометр аспіраційний МВ-4М	Від мінус 10 °С до 50 °С; Від 10% до 100 %	$\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ $\pm 4 \%$
Секундомір СОС пр. 2Б-2-000	Від 0 до 3600 с; Від 0 до 60 с; Більше 60 с	2 клас точності; $\pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60) \text{ с};$ $\pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540) \text{ с}$
Барометр-анероїд М 67	Від 600 мм. рт. ст. до 800 мм. рт. ст.	$\pm 1 \text{ мм рт. ст.}$
Тягонапомір ТНЖ-Н	Від 0 Па до 250 Па	$\pm 0,5 \%$

2.1.3. Устаткування для дослідження структури зразків

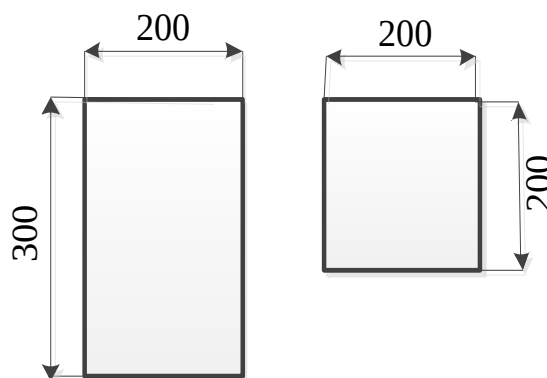
Для проведення дослідження структури зразків слід використати обладнання зазначене в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Обладнання для дослідження структури зразків

Штангельциркуль ШЦ-1	Від 0 до 125 мм	2 клас точності; $\pm 0,1$ мм
Лінійка вимірвальна	Від 0 до 1000 мм	± 1 мм
Лупа	$\times 5$	Фокусна відстань 62,5 мм

2.2 Методика виготовлення досліджуваних зразків дерев'яних колон

Для проведення випробувань обрано суцільний сосновий брус розмірами 200×200×300 мм (рисунк 2.5). Брус захищався 2 типами захисту. Здійснено облицювання по периметру плитою OSB товщиною 10 мм в один, два шари [62, 63].



Рисунк 2.5 – Схема експериментального зразка

Зразки виготовлено на пожежно-випробувальному полігоні УкрНДІЦЗ.

Перший етап підготовки деревини – сушка відбувалася в сушильній камері до моменту, коли вологість деревини досягла 12 % (Єврокод 5). Вологість деревини вимірюється за допомогою електровологоміра.

Другий етап підготовки деревини – розпилювання 3 дерев'яних брусів довжиною 4500 мм на 36 зразків по 300 мм завдовжки.

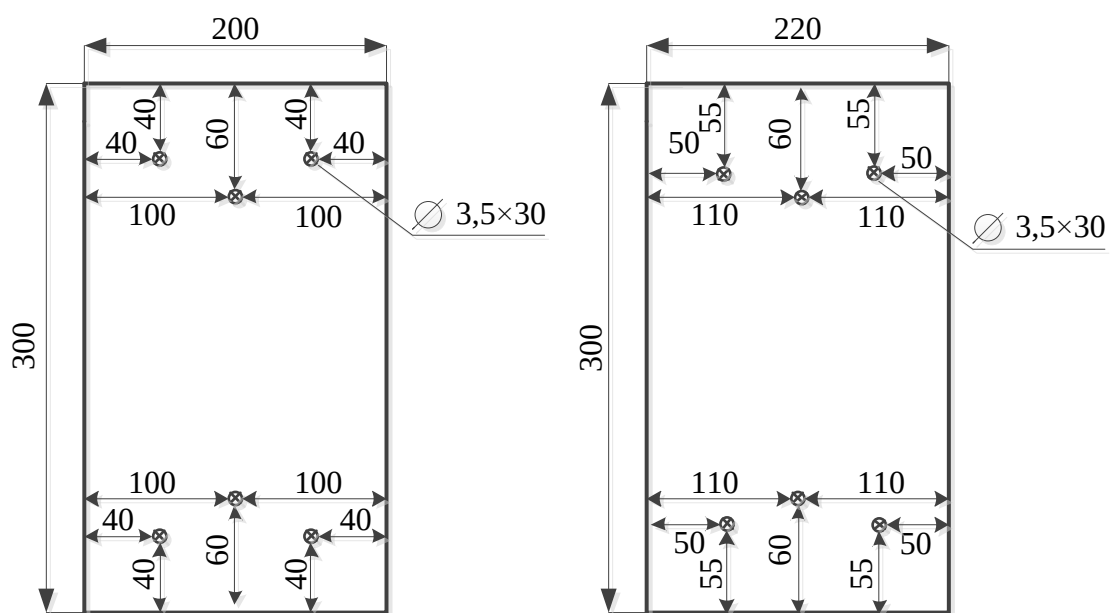
Третій етап підготовки деревини – облицювання зразків плитою OSB товщиною 10 мм.

Облицювання здійснювалось в один, два шари товщиною 10 мм кожен. Плити для облицювання дерев'яних зразків вирізалися таких розмірів:

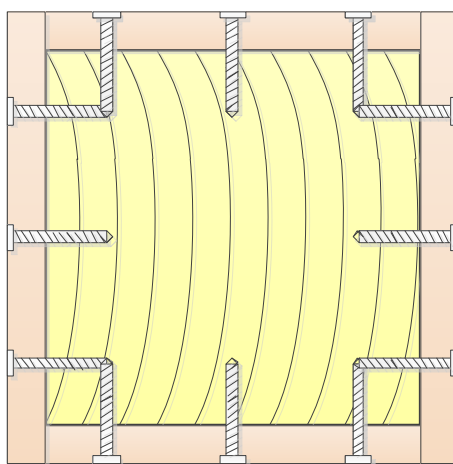
- облицювання зразка в 1 шар:
 - 2 плити розміром 200×300×10;
 - 2 плити розміром 220×300×10;
- облицювання зразка в 2 шари:
 - 2 плити розміром 200×300×10;
 - 4 плити розміром 220×300×10;
 - 2 плити розміром 240×300×10;

Кріплення плит до дерев'яного зразка здійснюється за допомогою саморізів розміром 3,5×30 мм в кількості 6 штук на одну плиту (всього 24) та саморізів розміром 3,5×60 мм в кількості 6 штук на одну плиту (всього 24).

Схема кріплення плит з для облицювання в один шар зображено на рисунку 2.6.



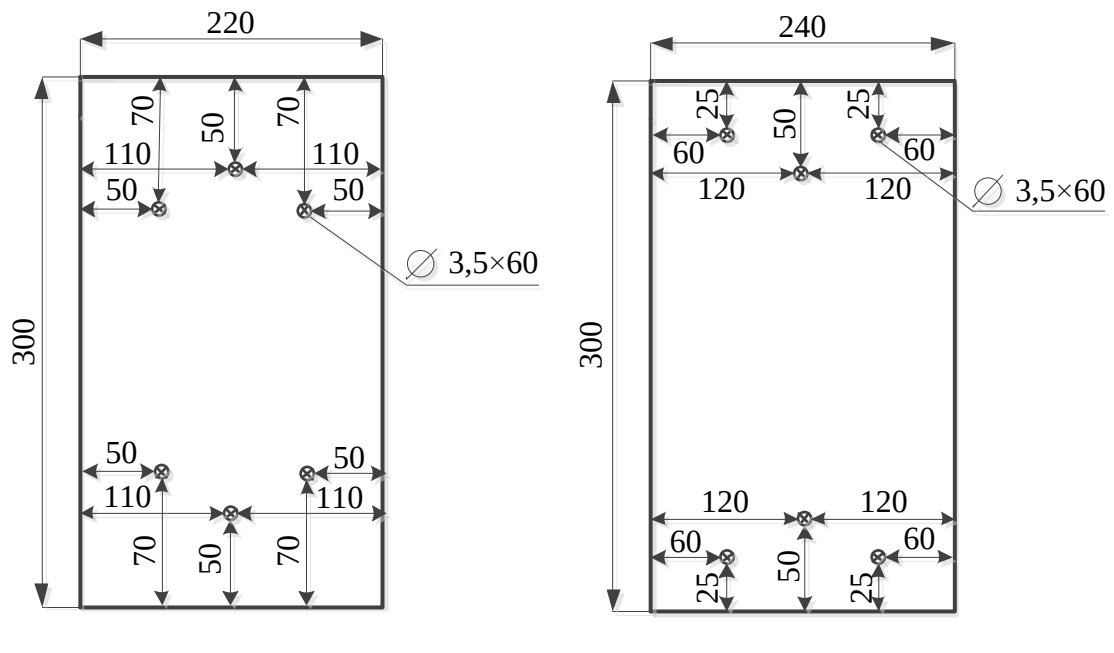
а)



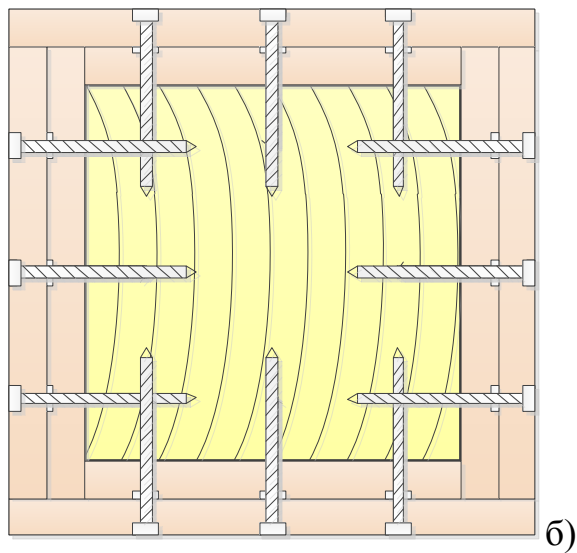
б)

Рисунок 2.6 – Схема кріплення облицювальних плит OSB товщиною 10 мм в 1 шар до зразка розміром 200×200×300 а) та вид зверху (переріз) б)

Схему кріплення плит OSB для здійснення облицювання в два шари зображено на рисунку 2.7.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Схема кріплення облицювальних плит OSB товщиною 10 мм в 2 шари до зразка розміром 200×200×300 а) та вид зверху (переріз) б)

Обладнання необхідне для облицювання дерев'яних зразків:

- циркулярка, пила;
- лінійка довжиною $l=1$ м;
- олівець;
- шуруповерт;

- дриль;
- свердло.

Основними видами вогнезахисного облицювання є вогнестійкі плити, найрозповсюдженіші з яких є вермекулітові, магнезитові, а також їхні похідні.

Прийнято раціоналізаторське рішення взяти як вогнезахисний матеріал для облицювання плиту OSB розмірами 2500×1250×10 мм в кількості 3 шт. Деякі характеристики найрозповсюдженіших плитних вогнезахисних матеріалів зазначені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Коротка характеристика плитних матеріалів

Характеристика	Плитний матеріал				
	Super isol	Эндотерм	Вермекуліт	Магнезит	OSB
Густина, кг/м ³	1200	950	700	1100	600-640
К-нт тепло-провідності, Вт/мК	0,47	0,015	0,13	0,24	0,13
Спосіб кріплення	каркасний	каркасний, клеєний	каркасний, клеєний	каркасний, клеєний	каркасний, клеєний
Середня ціна 1 м ²	1083 грн.	348 грн.	540 грн.	216 грн.	60 грн.

2.3 Методика досліджень поведінки зразків дерев'яних колон з облицюванням і без нього

Випробування слід проводити в такій послідовності:

1. Підготовчі процедури:

- перевірка кріплення 5 термопар в печі, що стаціонарно встановлені та їх під'єднання до інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт»;
- монтаж термопар одночасно в трьох дерев'яних зразках в кількості 5 шт. в кожному (рисунок 2.8) та під'єднання їх до інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт» ;

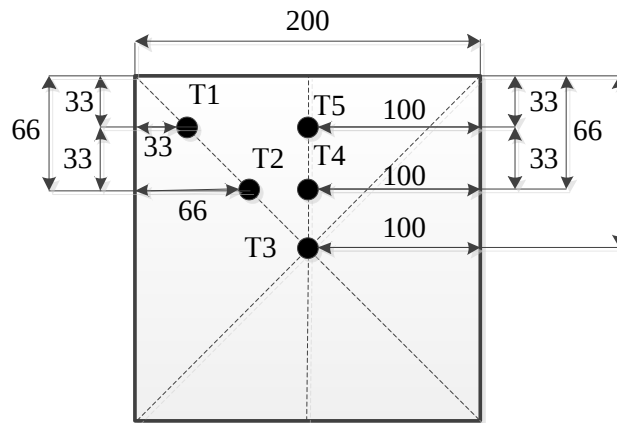


Рисунок 2.8 – Схема розташування термопар із зазначенням відстаней до місць їх кріплення*

*Примітка. При розміщенні термопар в зразках з облицюванням слід врахувати товщину шару облицювання 10 або 20 мм.

- перевірка та налагодження паливної системи;
- перевірка системи кондиціонування;
- встановлення досліджуваних зразків в печі (одночасно 3 зразки), ізоляція торців;
- перевірка та налагодження засобів вимірної техніки, приладів, ПК (рисунок 2.9);

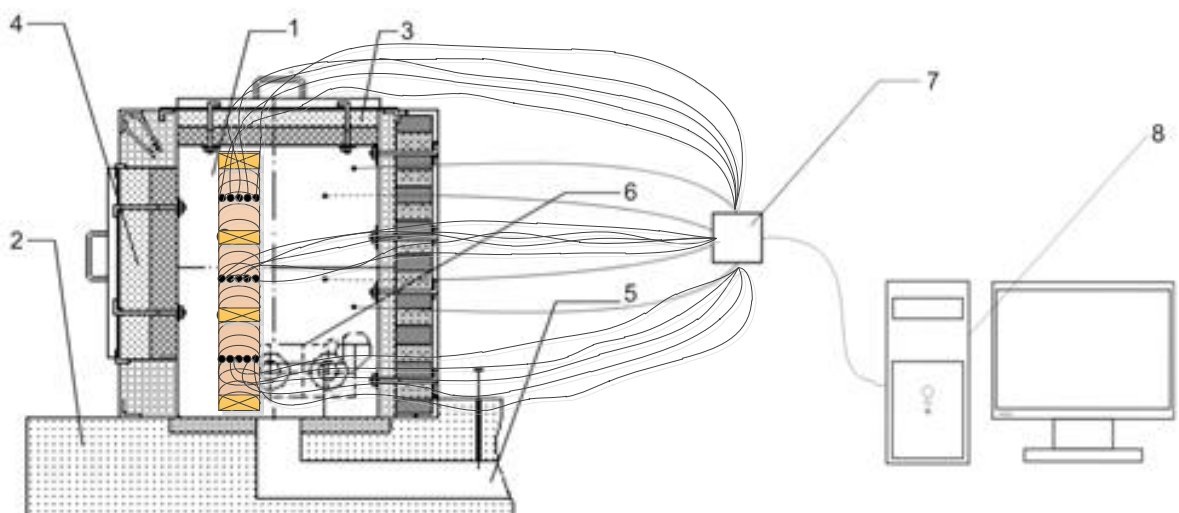


Рисунок 2.9 – Схема розміщення приладів у вогневій печі УкрНДЦЗ:
1 – вогнева камера; 2 – бетонна основа; 3,4 – теплоізоляційні кришки; 5 – канал виходу продуктів згорання; 6 – пальники; 7 – термоперетворювач; 8 – персональний комп'ютер

2. Проведення експерименту:

- баки заповнюються дизельним паливом;
- електродвигун насосу під'єднується до електромережі, вмикається, відкривається вентиль, розпочинається подача дизельного палива на пальник за допомогою регулятора, підпалюється дизельне паливо;
- перевіряється чутливість вторинних приладів термопар, що знаходяться в середині печі;
- за допомогою регулятора (вентиля) витримується стандартний температурний режим, згідно [13];
- знімаються показники через кожну хвилину з всіх термопар (5 термопар встановлених на кожному зразку і 5 термопар встановлених в печі), заносяться до протоколу протягом 15, 30, 60, 90 хвилин нагрівання.

3. Закінчення експерименту:

- охолодження зразка;
- фотофіксація зразка;
- візуальне дослідження зразка з описом стану зразка;
- замір шарів обвуглювання на кожній ділянці зразка;
- опрацювання даних отриманих під час проведення експериментальних досліджень за допомогою Mathcad [64, 65].

2.4 Методика реалізації теплових режимів нагріву зразків

Випробування досліджуваних зразків згідно з методикою п. 2.3 слід здійснювати так, щоб відбувся прогрів серединної точки квадратного перерізу зразка в розрахованому режимі. Виконуючи дослідження згідно п. 2.3 знаходиться коефіцієнт теплообміну між поверхнею дослідної колони і камерою спеціальної вогневої печі [66 - 68].

Підбирається режим прогріву камери печі при відомих коефіцієнтах теплообміну [69, 70]. Контроль режиму прогріву камери печі здійснюється за допомогою термопар ТХА (до 1100 °С).

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4-98* [13] під час проведення випробувань середньооб'ємна температура в печі T_f повинна змінюватися за стандартним температурним режимом, що визначається за залежністю:

$$T_f = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (2.1)$$

де t – час стандартного температурного режиму, хв., T_0 – початкова температура простору, $^{\circ}\text{C}$ ($T_0 \sim 20^{\circ}\text{C}$), T_f – температура у вогневій камері спеціальної вогневої печі для визначення меж вогнестійкості конструкцій в залежності від часу t .

Стандартний температурний режим повинен витримуватися в печі за допомогою регулювання інтенсивності подачі палива вентилем шляхом контролю відповідності значень, знайдених за формулою (2.1) і показників термопар, що знаходяться в камері вогневого впливу. Відхилення повинно не перевищувати допустимих значень ДСТУ Б В.1.1-4-98* та розраховуватися за формулою:

$$d = \frac{T_f - T_s}{T_s} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де T_s – температура реальної пожежі, $^{\circ}\text{C}$; T_f – температура стандартної пожежі, $^{\circ}\text{C}$.

При цьому відхилення d середньої температури в печі T_f від стандартного температурного режиму повинні не перевищувати таких значень [13]:

- а) $\pm 15\%$для $0 < t \leq 15$ хв.
- б) $\pm 15 - 0,5(t - 10)\%$для $15 < t \leq 30$ хв.
- в) $\pm 5 - 0,083(t - 30)$для $30 < t \leq 90$ хв.

Під час випробувань досліджуваних зразків дерев'яних колон, на окремих термопарах після 10 хв. випробування допускається відхилення

температури від стандартного температурного режиму не більше 100 °С, що видно з рисунку 2.10.

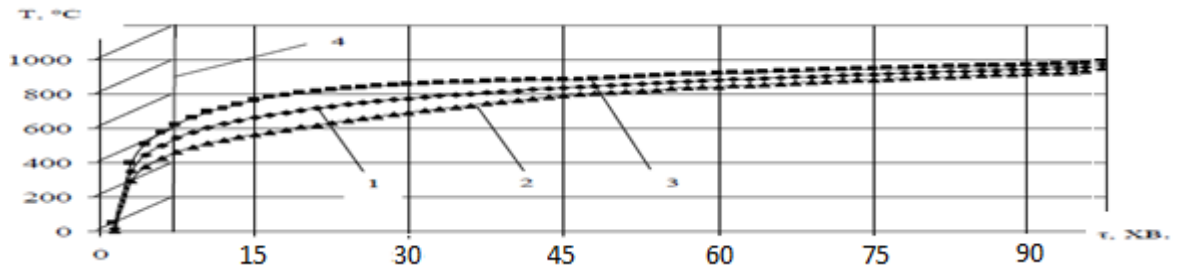


Рисунок 2.10 – Криві стандартного температурного режиму: 1- стандартна крива; 2 – нижній допуск; 3 – верхній допуск; 4 – проміжок часу, неконтрольованого відхилення середньої температури в спеціальній вогневій печі

Для того щоб отримати достовірні результати дослідження і створити необхідні умови прогріву деревини [71] торці випробувального зразку слід тепло ізолювати так як показано на рисунку. 2.3.

Вогневі випробування слід проводити в порядку визначеному в програмі досліджень, що наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Номенклатура досліджуваних зразків для випробувань

№п/п	Номер зразка	Тип облицювання	Час випробувань, хв
1	1.1.1; 1.2.1; 1.3.1	Облицювання зразка в 1 шар (І тип)	15
2	1.1.2; 1.2.2; 1.3.2	Облицювання зразка в 2 шари (ІІ тип)	15
3	1.1.0; 1.2.0; 1.3.0	Без облицювання	15
4	2.1.1; 2.2.1; 2.3.1	Облицювання зразка в 1 шар (І тип)	30
5	2.1.2; 2.2.2; 2.3.2	Облицювання зразка в 2 шари (ІІ тип)	30
6	2.1.0; 2.2.0; 2.3.0	Без облицювання	30
7	3.1.1; 3.2.1; 3.3.1	Облицювання зразка в 1 шар (І тип)	60
8	3.1.2; 3.2.2; 3.3.2	Облицювання зразка в 2 шари (ІІ тип)	60
9	3.1.0; 3.2.0; 3.3.0	Без облицювання	60
10	4.1.1; 4.2.1; 4.3.1	Облицювання зразка в 1 шар (І тип)	90
11	4.1.2; 4.2.2; 4.3.2	Облицювання зразка в 2 шари (ІІ тип)	90
12	4.1.0; 4.2.0; 4.3.0	Без облицювання	90

Перша цифра в позначенні зразка:

- 1 – перша серія експериментальних випробувань (15 хв);
- 2 – друга серія експериментальних випробувань (30 хв);
- 3 – третя серія експериментальних випробувань (60 хв);
- 4 – четверта серія експериментальних випробувань (90 хв).

Друга цифра в позначенні зразка:

- 1 – перший номер зразка відповідної серії;
- 2 – другий номер зразка відповідної серії;
- 3 – третій номер зразка відповідної серії.

Третя цифра в позначенні зразка:

- 1 – облицювання зразка в 1 шар (І тип);
- 2 – облицювання зразка в 2 шари (ІІ тип);
- 3 – зразок без облицювання (0).

Таким чином позначення зразка 1.1.1 розшифровується:

зразок першої серії експериментальних випробувань (15 хв), має перший порядковий номер даної серії випробувань (15 хв), має облицювання в 1 шар (І типу).

Кожен зразок під відповідним номером, зазначений в таблиці 2.5 встановлюється в печі на час, що зазначений в серії експериментальних випробувань, після закінчення встановленого часу, виймається з печі. З метою охолодження зразок обливається водою. Після охолодження розпилюється навпіл. За допомогою лінійки вимірюється товщина обвугленої зони, в мм. (рисунок 2.11). Результати заносяться в таблицю.

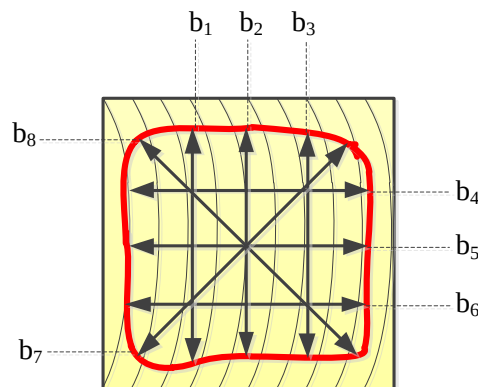


Рисунок 2.11 – Схема вимірювання геометричних параметрів зони обвуглювання зразка

2.5 Висновки за розділом

1. Для проведення експериментальних досліджень обрано соснові зразки розмірами $200 \times 200 \times 300$ мм, що задовольняють габаритам вогневої печі та є достатніми для того, щоб отримати необхідні результати. В якості вогнезахисту використовуються плити OSB товщиною 10 мм в один та два шари.

2. Визначення температурних показників здійснюється за допомогою п'яти термопар розташованих на різній глибині шарів дерев'яної колони, а також п'яти термопар розташованих у камері спеціальної вогневої печі за час випробування 15, 30, 60 та 90 хвилин при стандартному температурному режимі.

3. Запропоновано метод визначення геометричних параметрів зони обвуглювання досліджуваних зразків дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням на основі плит OSB та без нього. Для визначення обвугленої зони досліджуваних зразків здійснюються заміри залишкового перерізу після кожної серії вогневих випробувань. Вимірювання проводяться за допомогою лінійки після розпилювання зразків навпіл.

4. Запропоновано схему встановлення термопар у випробувальних зразках для забезпечення наближення ізотерм, які відтворюють температурне поле у перерізі зразка, щоб провести відтворення температурного розподілення у перерізі під тепловим впливом пожежі за стандартним температурним режимом.

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Результати експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі

Дерев'яні колони, в спорудах, виконують несучу функцію. В умовах пожежі при теплових впливах деревина піддається обвугленню, при цьому знижується її міцність, що з часом призводить до руйнування конструкції. Тому забезпечення необхідного класу вогнестійкості для дерев'яних колон являється першочерговим завданням.

Для вивчення поведінки дерев'яних колон в умовах пожежі проведено вогневі випробування їх зразків у спеціальній вогневій печі на протязі 15, 30, 60 та 90 хвилин. В якості досліджуваного зразка обрано сосновий брус розмірами 200×200×300 мм. Захист здійснювався плитою OSB товщиною 10 мм в один, два шари [62, 72- 74] (рисунок 3.1)



Рисунок 3.1 – Досліджувані зразки для проведення експериментальних досліджень

Результати дослідження представлені у вигляді графіків (рисунки 3.2 – 3.5) [75]. Під час проведення випробувань встановлено загальні характеристики для всіх досліджуваних зразків – середня температура на п'ятьох термопарах перед початком випробувань, встановлених у випробувальних зразках становила 20 °С, а початкова температура у камері випробувальної печі – 25 °С. Протягом всього періоду випробувань,

температурний режим у камері випробувальної печі був максимально близький до стандартного, відхилення температури не виходило за межі температурного діапазону в 100 °C. Так, згідно формули 2.1 температура у камері випробувальної печі становила: 349 °C на першій хвилині випробувань, 739 °C на 15 хвилині, 842 °C на 30 хвилині, 945 °C на 60 хвилині, 1006 °C на 90 хвилині вогневих випробувань.

При проведенні 15 хвилинних випробувань в умовах пожежі спостерігалася наступна поведінка дерев'яних зразків (рисунок 3.2) [75]. Досліджувані зразки без вогнезахисту показали такий температурний діапазон: на першій термопарі від 20 °C на першій хвилині до 159 °C на останній хвилині випробувань (розташування термопар дивись рисунок 2.8), на другій термопарі – від 20 °C до 43 °C, на третій термопарі – від 20 °C до 26 °C, на четвертій термопарі – від 20 °C до 28 °C, на п'ятій термопарі – від 20 °C до 45 °C. Досліджувані зразки без вогнезахисту, починаючи з 3 хвилини почали обвуглюватися, полуменеве горіння не спостерігалось аж до 5 хвилини, на протязі всього періоду випробування виділявся дим [75].

Досліджувані зразки з вогнезахистом у вигляді плит OSB в 1 шар (товщина 10 мм) краще протидіяли вогневому впливу, про це свідчать покази термопар: на першій термопарі температурні діапазони від 20 °C до 68 °C, на другій термопарі від 20 °C до 26 °C, на третій термопарі від 20 °C до 20 °C, на четвертій термопарі від 20 °C до 22 °C, на п'ятій термопарі від 20 °C до 33 °C. Якщо взяти до уваги покази термопар, то вже на 5 хвилині випробувань різниця в показах по першій термопарі становить близько 20 °C в порівнянні з зразками без вогнезахисту. На протязі всього даного часового проміжку експерименту спостерігалось тління плити OSB, руйнування якої не зафіксовано [75].

Досліджувані зразки з вогнезахисним облицюванням OSB в 2 шари (товщина 20 мм) найкраще протидіяли вогню, різниця в температурі на

першій термопарі вже на 5 хвилині в порівнянні з зразком без захисту становить близько 30 °С. Це свідчить про здатність даного вогнезахисту протидіяти тепловому впливу на деревину перешкоджаючи її займанню. Займання зразка не було зафіксовано. Протягом випробування були зафіксовані такі температурні діапазони показів термопар: на першій термопарі від 20 °С до 43 °С, на другій термопарі від 20 °С до 26 °С, на третій термопарі від 20 °С до 20 °С, на четвертій термопарі від 20 °С до 22 °С, на п'ятій термопарі від 20 °С до 33 °С [75].

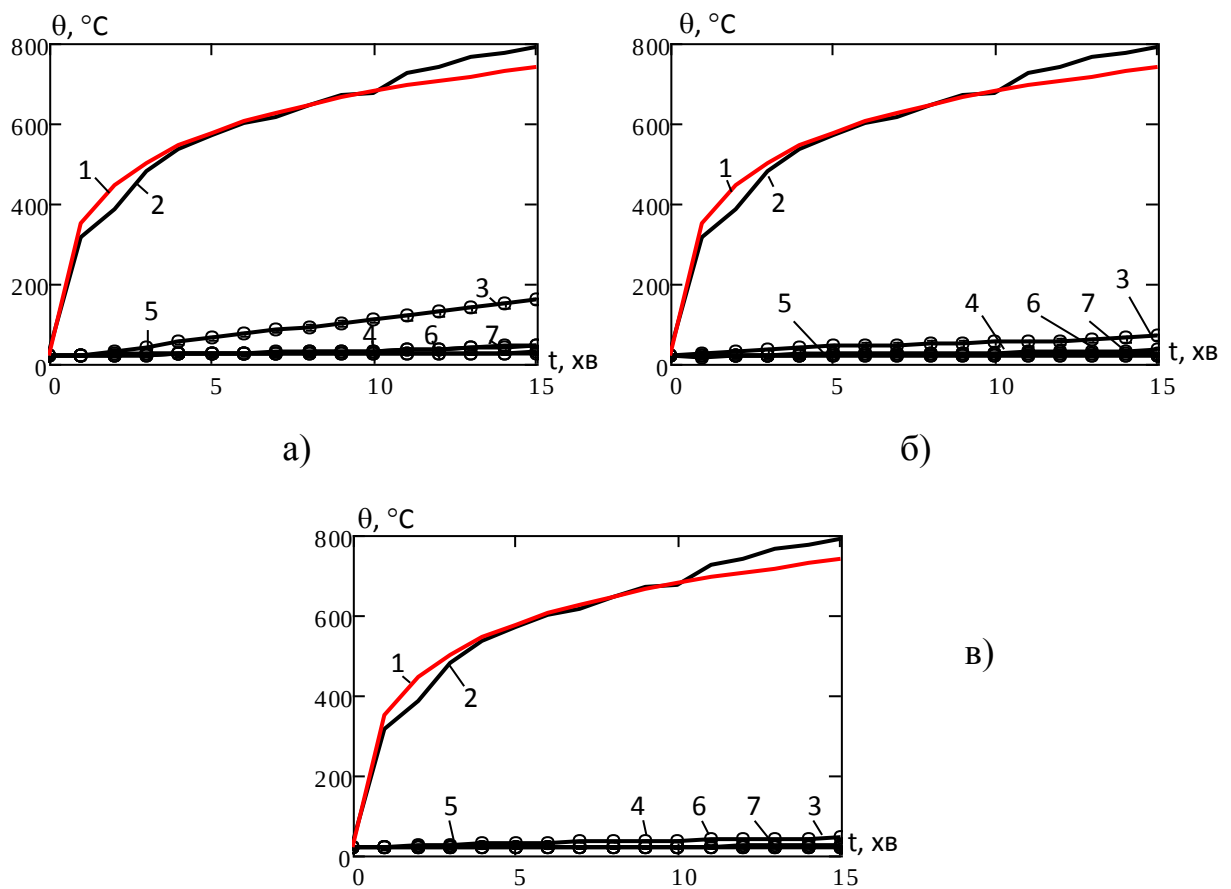


Рисунок 3.2 – Графіки 15-хв випробувань: 1 – стандартна температурна крива; 2 – середня температура в печі; 3 – середнє значення першої термопарі, 4 – середнє значення другої термопарі, 5 – середнє значення третьої термопарі, 6 – середнє значення четвертої термопарі, 7 – середнє значення п'ятої термопарі; а) зразки без захисту, б) зразки з захистом плитою OSB в один шар, в) зразки з захистом плитою OSB в два шари

На 30 хвилинному часовому проміжку випробувань спостерігалася більш чіткіша різниця на показах термопар між захищеними та незахищеними зразками (рисунок 3.3). У досліджуваних зразках без захисту наростання температури відбувалося з тією закономірністю, що й на 15 хвилинному часовому проміжку, полуменеве горіння спостерігалася починаючи з 5 хвилини випробувань. Зафіксовано такий діапазон температур: на першій термопарі від 20 °С до 355 °С, на другій – від 20 °С до 80 °С, на третій – від 20 °С до 25 °С, на четвертій – від 20 °С до 35 °С, на п'ятій – від 20 °С до 93 °С [75].

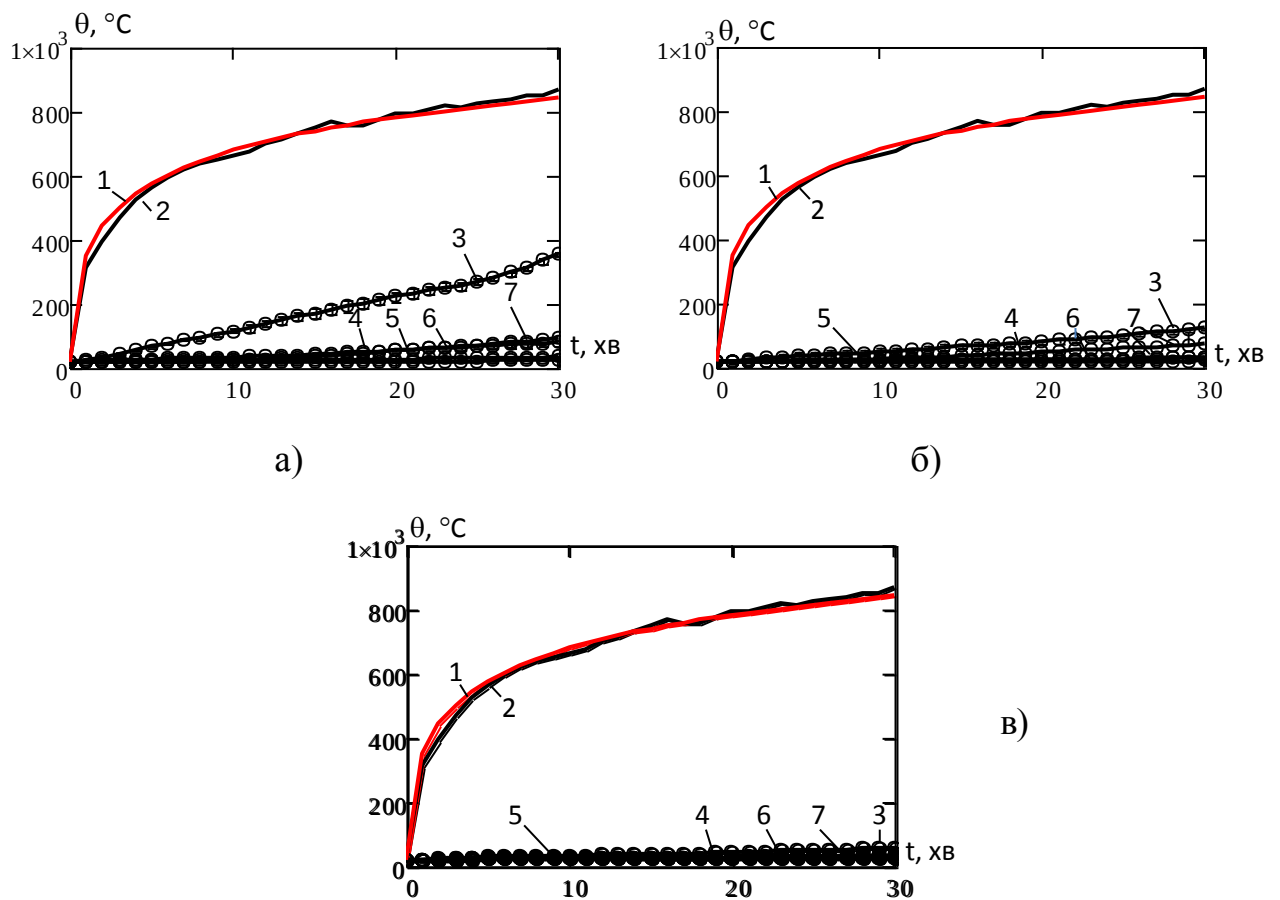


Рисунок 3.3 – Графіки 30-хвилинних випробувань: 1 – стандартна температурна крива; 2 – середня температура в печі; 3 – середнє значення першої термопари, 4 – середнє значення другої термопари, 5 – середнє значення третьої термопари, 6 – середнє значення четвертої термопари, 7 – середнє значення п'ятої термопари; а) зразки без захисту, б) зразки з захистом плитою OSB в один шар, в) зразки з захистом плитою OSB в два шари

Більш чіткі уявлення про роль вогнезахисту дали досліджувані зразки з вогнезахистом з плит OSB в 1 шар (товщина 10 мм). Так, на 30-ій хвилині випробувань різниця на показах термопар становить близько 200 °С, це видно з графіку (рисунок 3.3 б), однак, цього виявилось недостатньо для запобігання обвуглюванню деревини. Хоча обвуглення вогнезахисту відбулося повністю, проте до 30 хвилини він тримався на саморізах, тим самим перешкоджаючи прямої дії вогню на випробувальний зразок. Середній діапазон температур на термопарах був такий: на першій термопарі від 20 °С до 123 °С, на другій термопарі від 20 °С до 34 °С, на третій термопарі від 19 °С до 22 °С, на четвертій термопарі від 20 °С до 34 °С, на п'ятій термопарі від 20 °С до 73 °С [75].

Найліпші вогнезахисні властивості показав захист дерев'яного зразка облицюванням OSB в 2 шари (товщина 20 мм). Увесь період випробування наростання температури в зразку відбувалося досить повільно. Прогрівання досліджуваного зразка по першій термопарі, що знаходилася найближче до поверхні дійшло до позначки в 60 °С на 30-ій хвилині випробувань [75]. В цілому фактична температура на поверхні зразка в порівнянні з випробувальними зразками без захисту менша в 5 разів. Обвуглення досліджуваного зразка так і не почалося. Діапазон температур по термопарах: перша від 20 °С до 58 °С, друга від 20 °С до 34 °С, третя від 19 °С до 22 °С, четверта від 20 °С до 32 °С, п'ята від 20 °С до 34 °С [75].

Результати 60 хвилинних випробувань відображено у вигляді графіків (рисунок 3.4 [75]). На зразках без вогнезахисту починаючи з 30 хвилини відбулося різке зростання температури, про що свідчить графік на рисунок 3.4 (а). На термопарах встановлених на випробувальних зразках був зафіксований такий температурний діапазон: на першій – від 20 °С до 813 °С, на другій – від 20 °С до 232 °С, на третій – від 19 °С до 43 °С, на четвертій від 20 °С до 130 °С, на п'ятій від 20 °С до 642 °С.

Досліджувані зразки захищені плитою OSB в 1 шар (товщина 10 мм) показали набагато кращі результати в порівнянні з незахищеними,

починаючи з 40 хвилини випробування почалося плавне підвищення температури, що видно з графіка на рисунок 3.4 (б) [75], температурного стрибка зафіксовано не було. Температура по термопарах: на першій термопарі від 21 °С до 416 °С, на другій – від 20 °С до 118 °С, на третій – від 18 до 38 °С, на четвертій – від 20 °С до 80 °С, на п'ятій – від 20 °С до 214 °С.

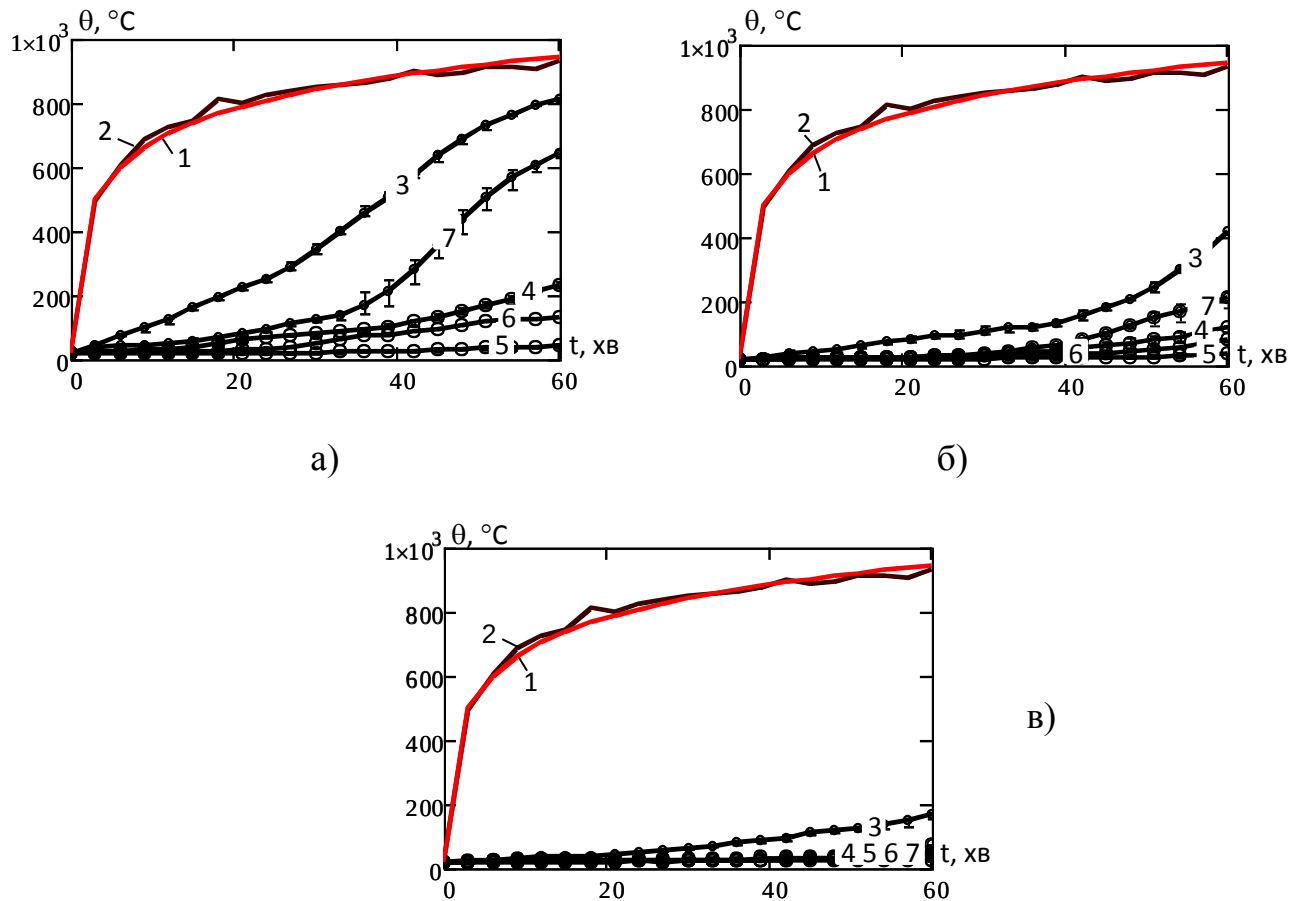


Рисунок 3.4 – Графіки 60-хвилинних випробувань: 1 – стандартна температурна крива; 2 – середня температура в печі; 3 – середнє значення першої термопари, 4 – середнє значення другої термопари, 5 – середнє значення третьої термопари, 6 – середнє значення четвертої термопари, 7 – середнє значення п'ятої термопари; а) зразки без захисту, б) зразки з захистом плитою OSB в один шар, в) зразки з захистом плитою OSB в два шари

Досліджувані зразки захищені плитою OSB в 2 шари (товщина 20 мм) продовжили тенденцію чинити протидію вогневому впливу. Незначне

підвищення температури зафіксовано на 40 хвилині випробування. В цілому на 60 хвилині різниця в температурі порівняно з зразками без захисту становить близько 600 °C, що свідчить про значні вогнезахисні властивості плити OSB при застосуванні її в 2 шари. Спостерігався такий діапазон температур на термопарах: на першій – від 21 °C до 166 °C, на другій – від 19 °C до 46 °C, на третій – від 19 °C до 23 °C, на четвертій – від 20 °C до 48 °C, на п'ятій – від 20 °C до 73 °C [75].

Найкраще виражена різниця між показами термопар спостерігалася на 90 хвилинному періоді випробування (рисунк 3.5) [75]. Цікава тенденція спостерігалася на третій термопарі, що знаходилась по середині перерізу досліджуваних зразків, різниця між її показами не перевищувала 100 градусів на всіх трьох дерев'яних зразках, незважаючи на те, що зразок без захисту обвуглився більше як на 100 мм, а це підтверджує низьку теплопровідність деревини. Випробування показали, що різниця в температурах слоїв в захищених та незахищених зразках може становити більше 400 °C [75]. В цілому відбувалося швидке наростання температури починаючи з 40 хвилини випробувань для зразків без захисту та з захистом за допомогою плит OSB в один шар. У досліджуваних зразках з захистом за допомогою плит OSB в два шари значне наростання температури розпочалося лише з 60 хвилини випробувань. В цілому спостерігався такий діапазон температур на термопарах. На першій термопарі: для досліджуваних зразків без захисту – від 20 °C до 944 °C, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 1 шар – від 20 °C до 861 °C, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 2 шари – від 20 °C до 661 °C. На другій термопарі: для досліджуваних зразків без захисту – від 20 °C до 481 °C, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 1 шар – від 19 °C до 212 °C, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 2 шари – від 20 °C до 116 °C. На третій термопарі: для досліджуваних зразків без захисту – від 19 °C до 110 °C, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 1 шар – від 19 до 108 °C, для зразків з захистом за допомогою

плит OSB в 2 шари – від 18 °С до 42 °С. На четвертій термопарі: для досліджуваних зразків без захисту – від 20 °С до 340 °С, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 1 шар – від 20 °С до 240 °С, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 2 шари – від 20 °С до 72 °С. На п'ятій термопарі: для досліджуваних зразків без захисту – від 20 °С до 777 °С, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 1 шар – від 19 °С до 771 °С, для зразків з захистом за допомогою плит OSB в 2 шари – від 20 °С до 321 °С.

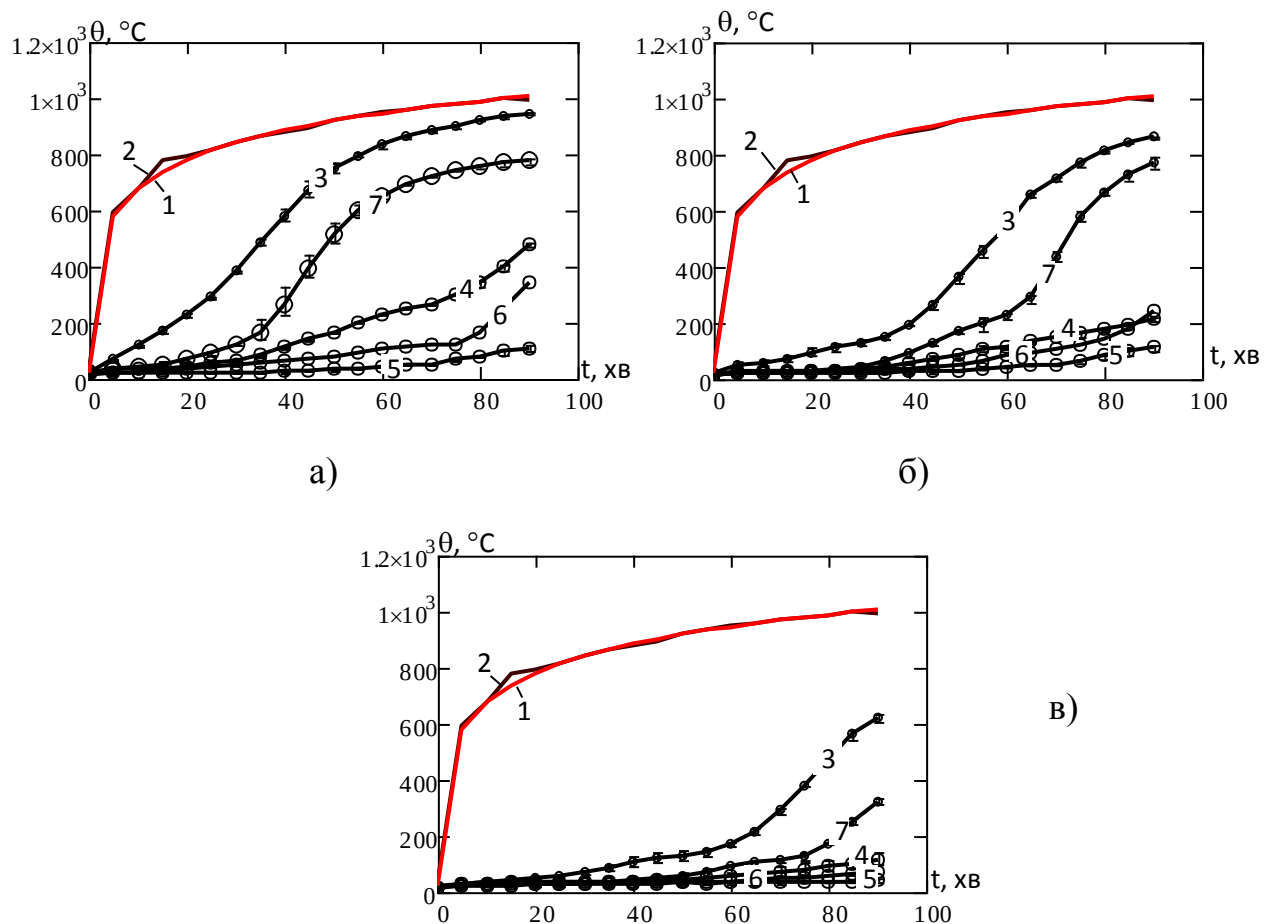


Рисунок 3.5 – Графіки 90-хвилинних випробувань: 1 – стандартна температурна крива; 2 – середня температура в печі; 3 – середнє значення першої термопарі, 4 – середнє значення другої термопарі, 5 – середнє значення третьої термопарі, 6 – середнє значення четвертої термопарі, 7 – середнє значення п'ятої термопарі; а) зразки без захисту, б) зразки з захистом плитою OSB в один шар, в) зразки з захистом плитою OSB в два шари

3.2 Залежність бічних товщин обвугленого шару зразків від тривалості стандартного температурного режиму пожежі

Дослідження обвугленого шару досліджуваних зразків дерев'яних колон відбувалося за результатами проведення експерименту відповідно до методики [62]. Для цього за допомогою лінійки та лупи згідно схемою зображеною на рисунку 3.6 проводилися заміри не обвугленого шару перерізу випробувального зразка. Результати замірів представлено у вигляді таблиці 3.1 [75].

Знаючи розміри перерізу досліджуваних зразків до початку проведення вогневих випробувань визначено зону обвугленого шару. Глибина обвугленого шару досліджуваних зразків являє собою середнє арифметичне глибин обвуглення, визначених розрахунковим шляхом відповідно до схеми рисунку 3.6.

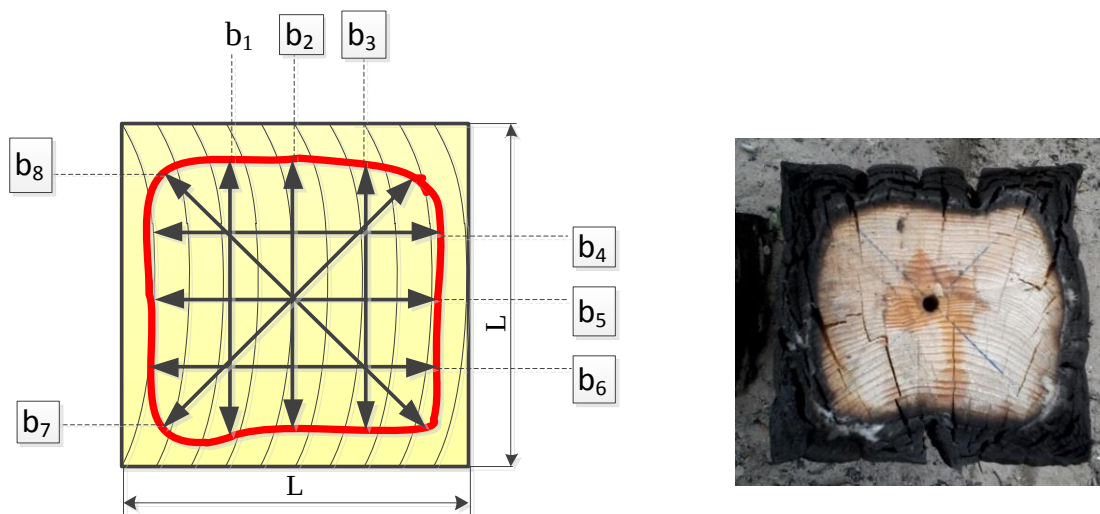


Рисунок 3.6 – Схема вимірювання ділянок залишкового перерізу досліджуваного зразка після проведення вогневих випробувань $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$ – величини заміру ділянок перерізу ділянок кожного досліджуваного зразка, що рівновіддалені один від одного та бокових торців зразка (окрім b_7, b_8 заміри яких проводяться по діагоналі), L – ширина зразка до початку випробування (квадратний переріз)

Таблиця 3.1 – Вимірювання зони обвуглювання

№ п/п [75]	Номер зразка	Тип облицювання	Час випробуванн я, хв	b ₁ , мм	b ₂ , мм	b ₃ , мм	b ₄ , мм	b ₅ , мм	b ₆ , мм	b ₇ , мм	b ₈ , мм	L, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1.1.1	ОСБ 1 шар	15	198	200	200	198	197	198	268	268	200
2	1.1.2	ОСБ 2 шари	15	200	200	200	200	200	200	280	280	200
3	1.1.0	б/о	15	175	175	175	173	175	175	235	235	200
4	1.2.1	ОСБ 1 шар	15	195	195	196	195	197	197	268	267	200
5	1.2.2	ОСБ 2 шари	15	200	200	200	200	200	200	280	280	200
6	1.2.0	б/о	15	175	174	175	175	175	173	235	232	200
7	1.3.1	ОСБ 1 шар	15	199	199	200	198	197	198	267	269	200
8	1.3.2	ОСБ 2 шари	15	200	200	200	200	200	200	280	280	200
9	1.3.0	б/о	15	174	175	175	175	174	175	234	235	200
10	2.1.1	ОСБ 1 шар	30	175	175	176	174	177	174	232	228	200
11	2.1.2	ОСБ 2 шари	30	200	200	200	200	200	200	280	280	200
12	2.1.0	б/о	30	156	155	155	153	155	152	200	199	200
13	2.2.1	ОСБ 1 шар	30	178	180	177	177	177	179	235	234	200
14	2.2.2	ОСБ 2 шари	30	200	200	200	200	200	200	280	280	200
15	2.2.0	б/о	30	160	164	157	160	161	159	207	206	200
16	2.3.1	ОСБ 1 шар	30	180	185	183	183	177	180	240	237	200
17	2.3.2	ОСБ 2 шари	30	200	200	200	200	200	200	279	279	200
18	2.3.0	б/о	30	157	149	155	157	155	153	206	207	200

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
19	3.1.1	ОСБ 1 шар	60	145	142	143	138	142	143	187	177	200
20	3.1.2	ОСБ 2 шари	60	162	165	167	165	165	169	215	214	200
21	3.1.0	б/о	60	110	112	117	110	121	117	143	152	200
22	3.2.1	ОСБ 1 шар	60	155	138	154	147	150	145	195	197	200
23	3.2.2	ОСБ 2 шари	60	169	165	166	172	171	170	213	215	200
24	3.2.0	б/о	60	110	118	120	113	122	115	150	150	200
25	3.3.1	ОСБ 1 шар	60	145	149	152	144	138	145	187	187	200
26	3.3.2	ОСБ 2 шари	60	169	165	167	176	175	172	220	222	200
27	3.3.0	б/о	60	117	115	110	112	115	116	142	144	200
28	4.1.1	ОСБ 1 шар	90	95	100	105	90	99	120	133	140	200
29	4.1.2	ОСБ 2 шари	90	134	120	134	127	120	126	162	165	200
30	4.1.0	б/о	90	70	80	69	77	90	79	94	99	200
31	4.2.1	ОСБ 1 шар	90	105	112	109	115	97	108	132	132	200
32	4.2.2	ОСБ 2 шари	90	130	118	130	130	134	138	160	171	200
33	4.2.0	б/о	90	71	75	78	85	89	82	95	96	200
34	4.3.1	ОСБ 1 шар	90	110	112	107	103	90	105	125	134	200
35	4.3.2	ОСБ 2 шари	90	135	127	127	130	122	127	155	164	200
36	4.3.0	б/о	90	70	78	69	70	79	82	90	93	200

Візуальним оглядом (рисунок 3.7) та проведеними вимірюваннями підтверджено гіпотезу, що глибина обвуглення дерев'яних колон залежить від товщини вогнезахисту та часу вогневої дії [75].

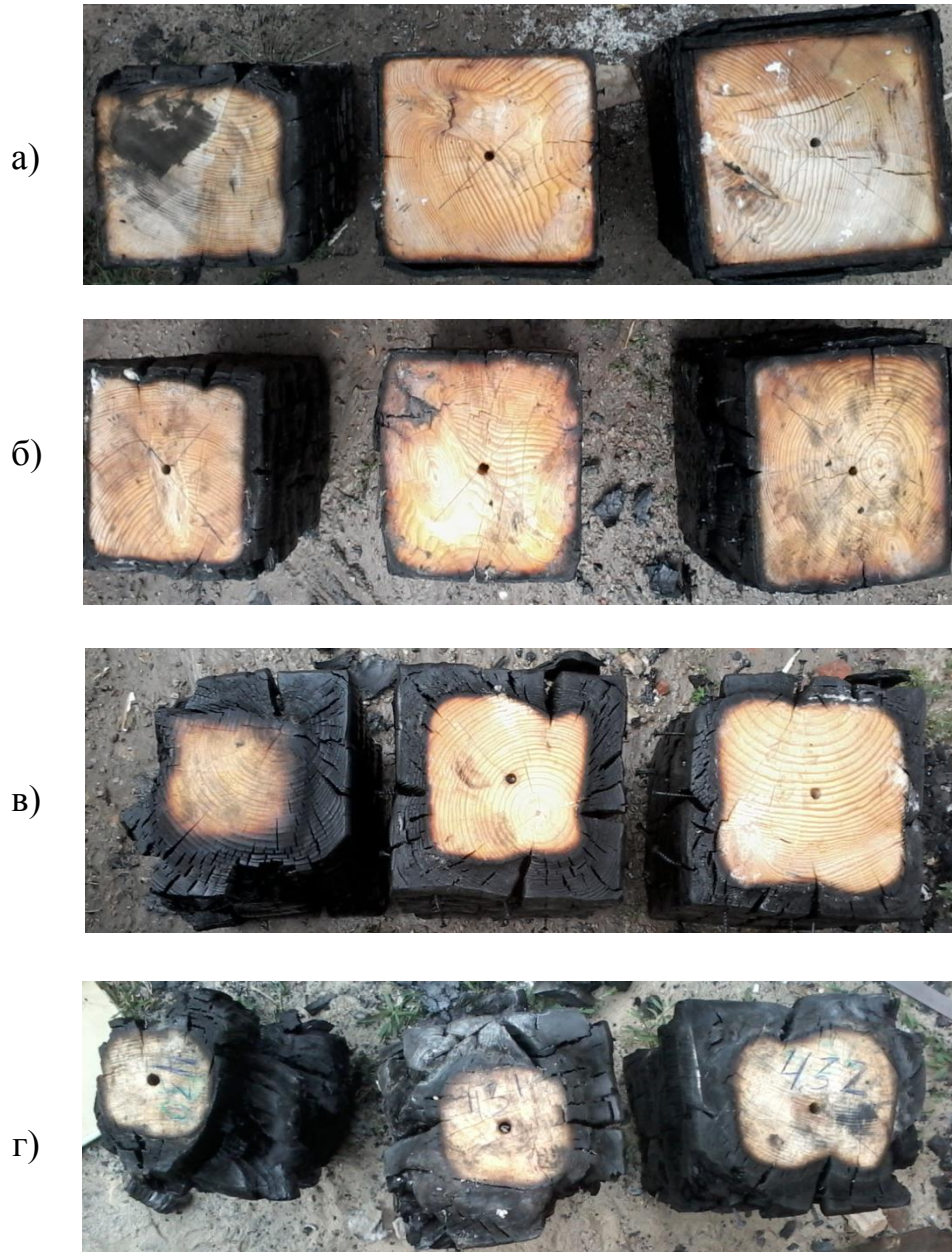


Рисунок 3.7 – Фото досліджуваних зразків після проведення вогневих випробувань (зразки зліва направо: без захисту, з захистом плитою OSB в один та два шари): а) обвуглення зразків після 15 хвилинного; б) 30 хвилинного; в) 60 хвилинного; г) 90 хвилинного випробувань

Опрацювавши отримані результати під час проведення експериментальних досліджень, обчислено середню товщину обвугленого шару квадратного перерізу випробувальних зразків дерев'яних колон з вогнезахистом та без нього. Залежності товщин обвуглювання від часу вогневої дії подано у вигляді графіків (рисунок 3.8) [76].

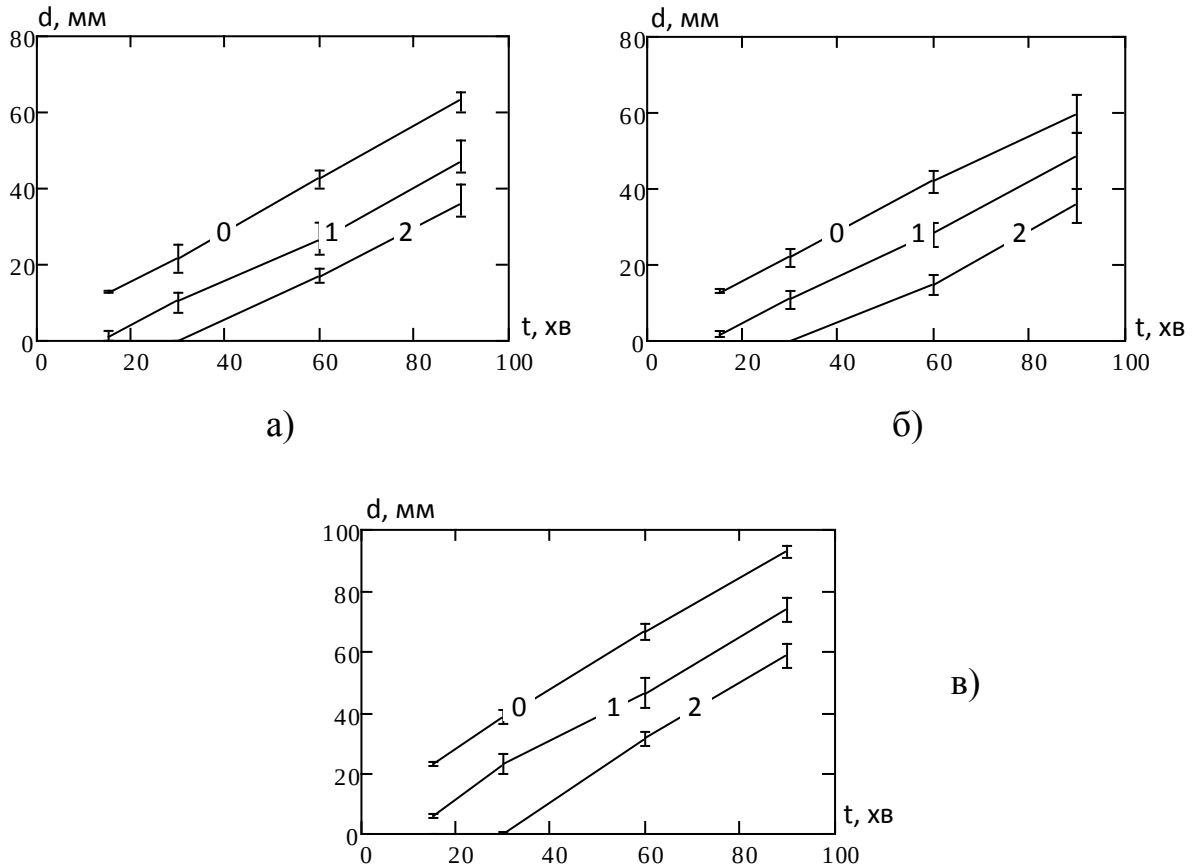


Рисунок 3.8 – Графіки залежностей бічних товщин обвугленого шару від часу вогневого випробування зразків (дивись рисунок 3.6): а) обвуглення сторони b_{13} зразка, б) обвуглення сторони b_{46} зразка, в) обвуглення по діагоналях перерізу b_{78} ; 0 – без захисту, 1 – з захистом плитою OSB в один шар, 2 – з захистом плитою OSB в два шари

З графіків рисунку 3.8 видно, що при вогневій дії на зразки, їх обвуглювання по периметру відбувалося не повністю рівномірно, чітко виражено різницю між захищеними та не захищеними від вогневої дії зразками [76].

Обчислена товщина обвугленої зони була апроксимована у вигляді поліномів. Коефіцієнти регресії наведено в таблицях 3.2 – 3.4 [76].

Таблиця 3.2 – Параметри регресійних залежностей бокової товщини обвуглювання від часу випробування зразків сторони b_{13} зразка

Коефіцієнти регресії [76] $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	a_0 , мм	a_1 , мм/хв ⁻¹	a_2 , мм/хв ⁻²	a_3 , мм/хв ⁻³
Без захисту	5.188	0.423	5.269×10^{-3}	-3.099×10^{-5}
ОСБ в 1 шар	-11.522	0.962	-9.468×10^{-3}	6.666×10^{-5}
ОСБ в 2 шари	-2.86	0.042	4.366×10^{-3}	—

Таблиця 3.3 – Параметри регресійних залежностей бокової товщини обвуглювання від часу випробування зразків сторони b_{46} зразка

Коефіцієнти регресії [76] $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	a_0 , мм	a_1 , мм/хв ⁻¹	a_2 , мм/хв ⁻²	a_3 , мм/хв ⁻³
Без захисту	5.369	0.417	5.782×10^{-3}	-4.173×10^{-5}
ОСБ в 1 шар	-10.699	0.904	-7.289×10^{-3}	5.061×10^{-5}
ОСБ в 2 шари	-0.525	-0.103	5.679×10^{-3}	—

Таблиця 3.4 – Параметри регресійних залежностей бокової товщини обвуглювання від часу випробування зразків по діагоналях перерізу b_{78} зразка

Коефіцієнти регресії [76] $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	a_0 , мм	a_1 , мм/хв ⁻¹	a_2 , мм/хв ⁻²	a_3 , мм/хв ⁻³
Без захисту	7.348	1.044	-7.266×10^{-4}	-3.677×10^{-6}
ОСБ в 1 шар	-17.934	1.906	-0.022	1.395×10^{-4}
ОСБ в 2 шари	-8.877	0.334	4.747×10^{-3}	—

На рисунку 3.9 подано графіки регресійних залежностей обвугленого шару по сторонам перерізу квадратного перерізу та його діагоналях для досліджуваних зразків дерев'яних колон без захисту, з захистом за допомогою плити ОСБ в один та два шари [76].

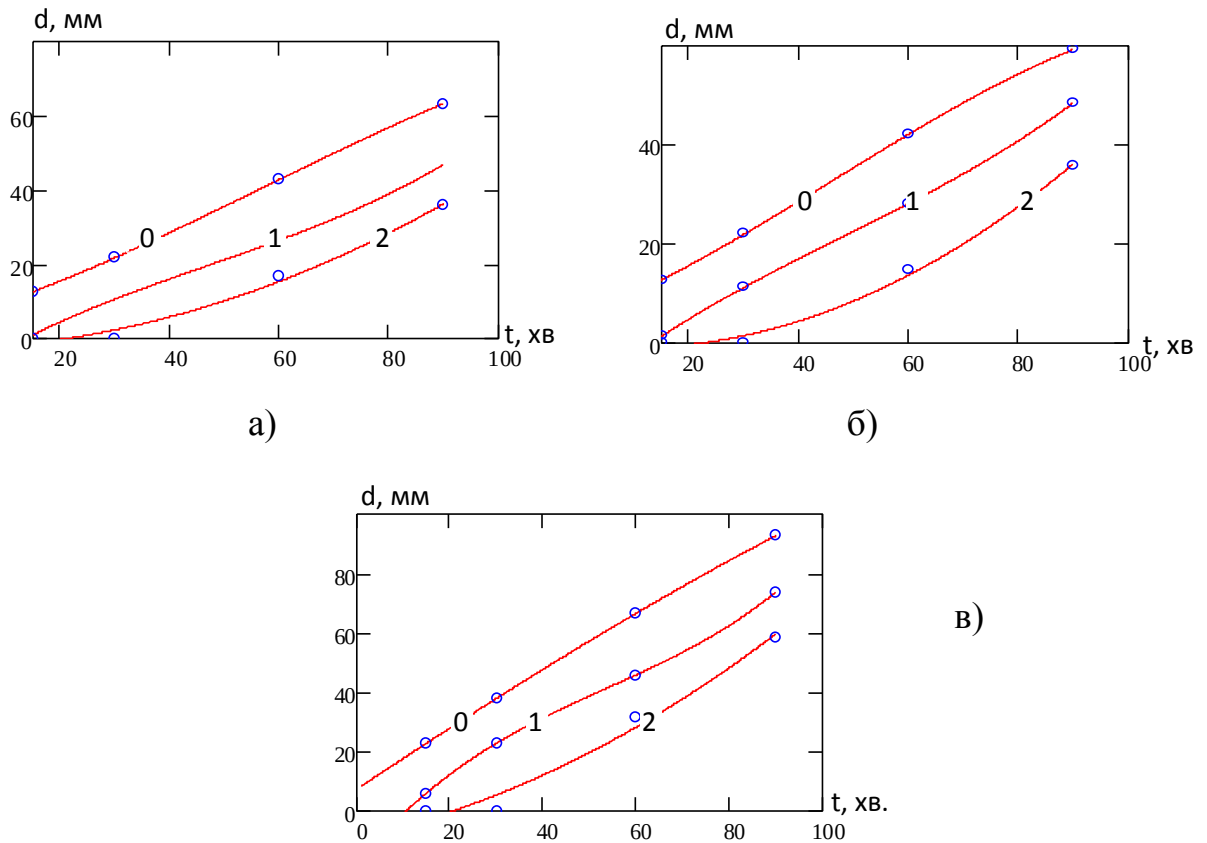


Рисунок 3.9 – Регресійні залежності обвугленого шару від часу вогневого випробування зразків (дивись рисунок 3.6): а) обвуглення сторони b_{13} зразка, б) обвуглення сторони b_{46} зразка, в) обвуглення по діагоналях перерізу b_{78} ; 0 – без захисту, 1 – з захистом плитою OSB в один шар, 2 – з захистом плитою OSB в два шари

З метою більш детального відображення процесу обвуглення досліджуваних зразків дерев'них колон без вогнезахисту, із захистом за допомогою плит OSB в один та два шари в залежності від часу вогневої дії за стандартним температурним режимом, здійснено моделювання обвугленої зони (рисунок 3.10 [76]). Моделювання здійснювалося за допомогою програмного забезпечення Mathcad на основі апроксимації отриманих результатів при проведенні експерименту шляхом нанесення контрольних точок вимірювання (дивись рисунок 3.6) на Декартову систему координат [76, 77].

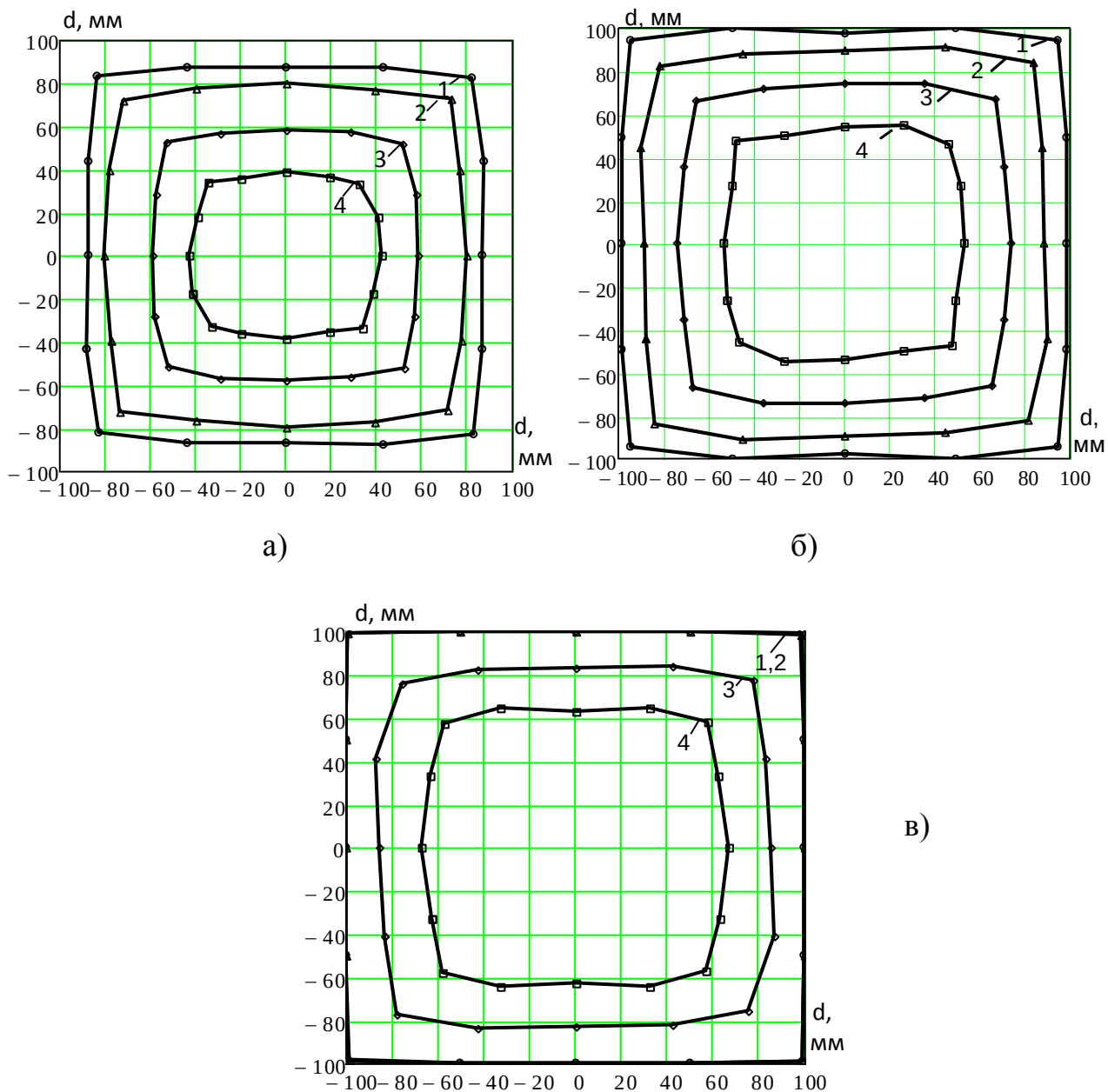


Рисунок 3.10 – Обвуглення перерізу досліджуваних зразків в залежності від часу вогневого впливу: а) зразок без захисту, б) зразок з захистом плитою OSB в 1 шар, в) зразок з захистом плитою OSB в 2 шари; 1– лінія обвуглення після 15 хвилинного випробування, 2 – лінія обвуглення після 30 хвилинного випробування, 3 – лінія обвуглення після 60 хвилинного випробування, 4 – лінія обвуглення після 90 хвилинного випробування

3.3 Визначення швидкості обвуглювання досліджуваних зразків

Швидкість обвуглювання при односторонньому обвуглюванні (рисунок 3.11) повинна прийматися сталою в часі. Розрахункове значення глибини обвуглювання визначається за формулою [58]:

$$d_{char,0} = \beta_0 t, \quad (3.1)$$

де $d_{char,0}$ – розрахункове значення глибини при односторонньому обвуглюванні;

β_0 – розрахункове значення швидкості одностороннього обвуглювання при стандартному впливі пожежі;

t – тривалість впливу пожежі.

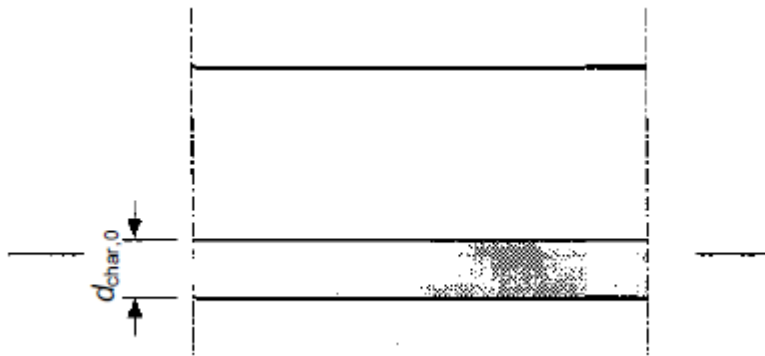


Рисунок 3.11 – Одностороннє обвуглювання широкого поперечного перерізу

Умовна швидкість обвуглювання враховує вплив кутових заокруглень і тріщин (рисунок 3.12 [58]). Дана швидкість приймається сталою в часі. Розрахункове значення умовної глибини обвуглювання визначається за формулою:

$$d_{char,n} = \beta_n t, \quad (3.2)$$

де $d_{char,n}$ – розрахункове значення умовної глибини обвуглювання, включаючи вплив кутових заокруглень;

β_n – розрахункове значення умовної швидкості обвуглювання, що враховує вплив кутових заокруглень і тріщин.

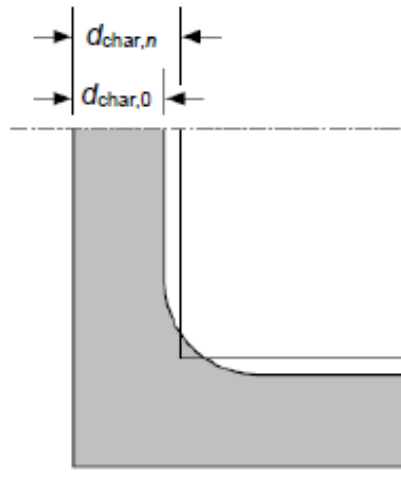


Рисунок 3.12 – Розрахункова $d_{char,0}$ і умовна $d_{char,n}$ глибина обвуглювання при односторонньому обвуглюванні

Розрахункове значення односторонньої швидкості обвуглювання може використовуватись у випадку підвищення кутового обвуглювання для поперечного перерізу з початковою мінімальною шириною b_{min} [58].

$$b_{min} = \begin{cases} 2d_{char,0} + 80, & \text{для } d_{char,0} \geq 13\text{mm}; \\ 8,15d_{char,0}, & \text{для } d_{char,0} < 13\text{mm}. \end{cases} \quad (3.3)$$

Якщо мінімальна ширина поперечного перерізу є меншою ніж b_{min} , необхідно застосовувати розрахункове значення умовної швидкості обвуглювання.

Для дерев'яних поверхонь, не захищених протягом усього впливу пожежі, розрахункове значення швидкостей обвуглювання β_0 і β_n вказані в таблиці 3.5 [58].

Для поперечних перерізів, розміри яких визначаються за допомогою розрахункового значення одновимірної швидкості обвуглювання, радіус заокруглення кутів повинен прийматися відповідно до глибини обвуглювання $d_{char,0}$.

Таблиця 3.5 – Розрахункові значення швидкості обвуглювання β_0 і β_n для деревини, LVL, дерев'яних панелей і дерев'яних плит

Матеріал [58]	β_0 , мм/хв [58]	β_n , мм/хв [58]
а) Деревина хвойних порід і бук		
Клеєна деревина з нормативною густиною $\rho \geq 290 \text{ кг/м}^3$	0,65	0,7
Цільна деревина з нормативною густиною $\rho \geq 290 \text{ кг/м}^3$	0,65	0,8
б) Деревина листяних порід		
Цільна або клеєна деревина з нормативною густиною $\rho \geq 290 \text{ кг/м}^3$	0,65	0,7
Цільна або клеєна деревина з нормативною густиною $\rho \geq 450 \text{ кг/м}^3$	0,50	0,55
в) LVL		
З нормативною густиною $\rho \geq 480 \text{ кг/м}^3$	0,65	0,7

Використовуючи дані отримані при проведенні експериментальних досліджень обчислено швидкості обвуглення зразків. Для зразків без вогнезахисного облицювання, розрахункові швидкості обвуглювання, окрім того що визначено експериментально, порівнювалися з даними наведеними в таблиці 3.5.

Обчислення швидкості обвуглення відбувалося як для зразків з вогнезахистом так і без нього. З метою більш детального дослідження наростання чи спадання швидкості, розрахунки проводилися по сторонам перерізу квадрата (дивись рисунок 3.6), а також по його діагоналям. Результати визначення швидкості обвуглювання подано у вигляді графіків (рисунок 3.13 [76]). З графіків видно, що за умов вогневого впливу на зразки при стандартному температурному режимі зміна швидкості відбувалася не повністю рівномірно. Особливо чітко виражена різниця між зразками без вогнезахисту та з ним. Так, в незахищених досліджуваних зразках відбувалося спадання швидкості від початку вогневих випробувань і аж до їх завершення. На зразках із захистом плитою OSB в 1 шар зростання швидкості відбулося тільки після втрати облицюванням захисних властивостей, а саме через 15 хв з моменту початку випробувань. Дещо кращі

вогнезахисні властивості продемонстрував захист дерев'яної колони плитою OSB в 2 шари, обуглення і відповідно зростання швидкості розпочалося тільки через 30 хвилин з моменту початку випробування. Наростання швидкості в захищених зразках відбувалося аж до закінчення випробувань.

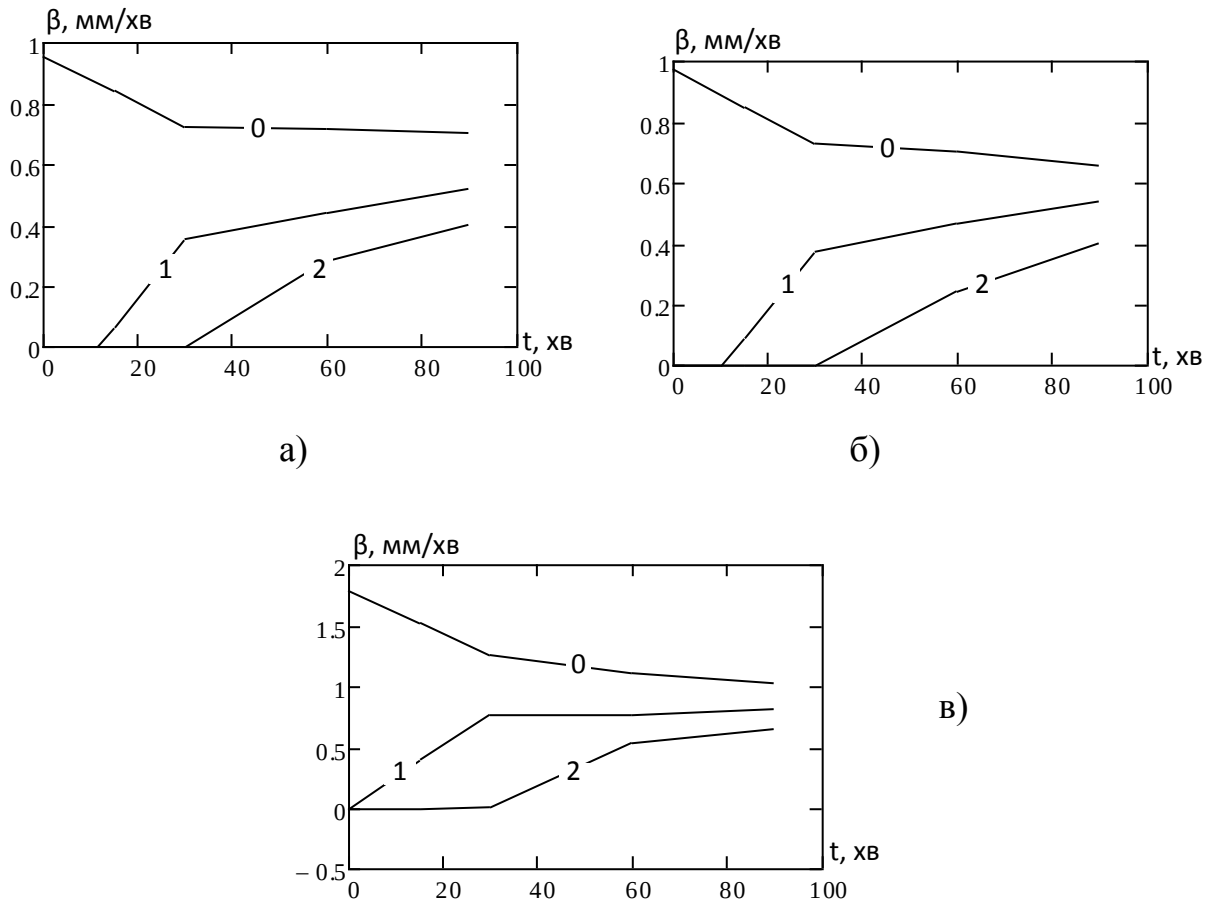


Рисунок 3.13 – Залежність бічних швидкостей обуглення від часу вогневого випробування зразків (дивись рисунок 3.6): а) швидкість обуглення сторони b_{13} зразка, б) швидкість обуглення сторони b_{46} зразка, в) швидкість обуглення по діагоналях перерізу b_{78} ; 0 – без захисту, 1 – з захистом плитою OSB в один шар, 2 – з захистом плитою OSB в два шари

Обчислена швидкість обуглення була апроксимована у вигляді поліномів. Коефіцієнти регресії наведено в таблицях 3.6 – 3.8 [76].

Таблиця 3.6 – Параметри регресійних залежностей швидкості обуглювання від часу випробування зразків сторони b_{13} зразка

Коефіцієнти регресії [76] $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$a_0,$ мм/хв	$a_1,$ (мм/хв)/хв ⁻¹	$a_2,$ (мм/хв)/хв ⁻²	$a_3,$ (мм/хв)/хв ⁻³
Без захисту	1.086	-0.022	3.86×10^{-4}	-2.138×10^{-6}
ОСБ в 1 шар	-0.045	0.01	1.506×10^{-5}	-6.536×10^{-7}
ОСБ в 2 шари	-0.129	6.533×10^{-3}	-5.974×10^{-6}	—

Таблиця 3.7 – Параметри регресійних залежностей швидкості обуглювання від часу випробування зразків сторони b_{46} зразка

Коефіцієнти регресії [76] $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$a_0,$ мм/хв	$a_1,$ (мм/хв)/хв ⁻¹	$a_2,$ (мм/хв)/хв ⁻²	$a_3,$ (мм/хв)/хв ⁻³
Без захисту	1.105	-0.022	3.929×10^{-4}	-2.232×10^{-6}
ОСБ в 1 шар	-0.047	0.012	-2.47×10^{-5}	-4.421×10^{-7}
ОСБ в 2 шари	-0.09	4.111×10^{-3}	1.591×10^{-5}	—

Таблиця 3.8 – Параметри регресійних залежностей швидкості обуглювання від часу випробування зразків по діагоналях перерізу b_{78} зразка

Коефіцієнти регресії [76] $d(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$	$a_0,$ мм/хв	$a_1,$ (мм/хв)/хв ⁻¹	$a_2,$ (мм/хв)/хв ⁻²	$a_3,$ (мм/хв)/хв ⁻³
Без захисту	1.982	-0.039	5.852×10^{-4}	-3.02×10^{-6}
ОСБ в 1 шар	-0.018	0.042	-6.989×10^{-4}	3.754×10^{-6}
ОСБ в 2 шари	-0.282	0.015	-5.044×10^{-5}	—

На рисунку 3.14 [76] відображено графіки регресійних залежностей швидкості наростання шару обуглювання по сторонам перерізу квадрата та його діагоналях для досліджуваних зразків дерев'яних колон без вогнезахисного облицювання, з вогнезахисним облицюванням за допомогою плит ОСБ в один та два шари.

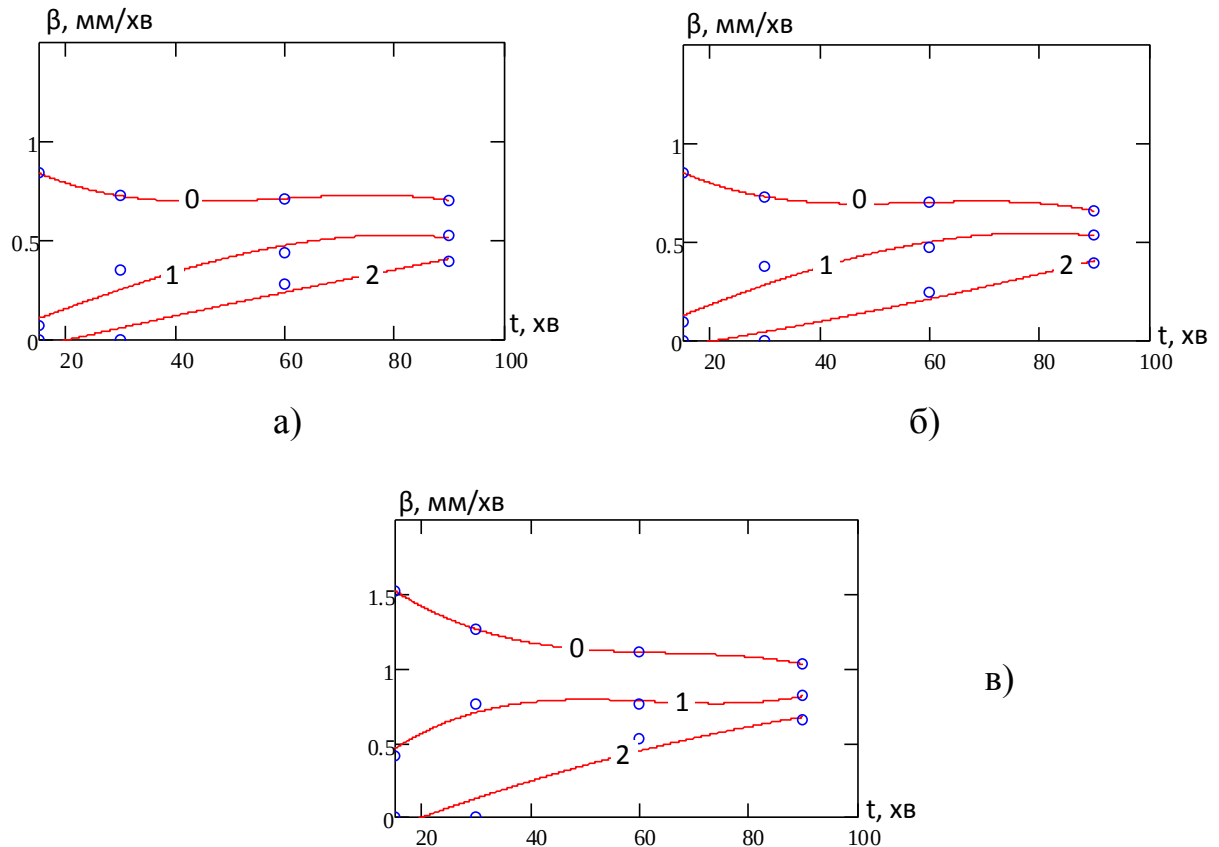


Рисунок 3.14 – Регресійні залежності бічних швидкостей обуглення від часу вогневого випробування зразків (дивись рисунок 3.6): а) швидкість обуглення сторони b_{13} зразка, б) швидкість обуглення сторони b_{46} зразка, в) швидкість обуглення по діагоналях перерізу b_{78} ; 0 – без захисту, 1 – з захистом плитою OSB в один шар, 2 – з захистом плитою OSB в два шари

3.4. Оцінка достовірності отриманих результатів вимірювання температури у зразках

3.4.1. Математична модель теплопровідності у досліджуваному зразку дерев'яної колони при його вогневих випробуваннях.

Згідно із підходом, що описаний у роботах [58, 78 – 85] теплотехнічний розрахунок елементів дерев'яних конструкцій при пожежі із стандартним температурним режимом базується на таких положеннях та припущеннях:

1. Математичне описання процесу теплопровідності [86] у конструктивних елементах дерев'яних конструкцій базується на застосуванні

рівняння теплопровідності з граничними умовами (ГУ) III роду для конвекційного і променистого теплообміну із середовищем пожежі.

2. Температурний режим пожежі відповідає стандартної логарифмічної температурної кривої пожежі.

3. Теплофізичні характеристики (ТФХ) деревини – коефіцієнт теплопровідності, теплоємність та густина представляються температурними залежностями згідно ДСТУ Б.Н. EN 1995-1-2: 2012 Eurocode 5 (IDT). Теплофізичні характеристики повітря у каналах для розміщення термопар та хром-алюмелевого дроту термопар приймаються за довідниковими даними, що входять у основну базу посилань для інженерних розрахунків, а саме [58, 84].

4. При постановці задачі теплопередачі анізотропія теплофізичних властивостей не враховується, також не враховуються додаткові джерела або стоки теплової енергії [87] за рахунок хімічних реакцій або фізичних фазових перетворень.

6. Для рішення рівняння теплопровідності застосовується метод кінцевих елементів (МКЕ) з фізично нелінійною реалізацією з використанням комп'ютерної системи ANSYS APDL.

7. Вважається, що протягом контрольного часу розрахунку зберігається цілісність та однорідність матеріалу, тобто наявність тріщин та зони обуглювання не враховується введенням у розрахункову область відповідних підобластей. Дані фізичні особливості враховуються при введенні відповідних ефективних теплотехнічних характеристик деревини, як вказано вище у п. 4.

Згідно із встановленими положеннями та припущеннями рівняння теплопровідності має бути записане у наступному вигляді [78 – 84]:

$$c_p(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} - \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta) = 0, \quad (3.4)$$

де $\rho(\theta)$ - густина,

$c_p(\theta)$ – питома теплоємність,

$\lambda(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності, залежні від температури θ .

Традиційно при постановці крайової задачі теплопровідності використовуються граничні умови III роду [78 – 84]:

$$\lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} + \alpha(\theta_p - \theta_w) = 0, \quad (3.5)$$

де θ_p – температура у просторі приміщення із пожежею,

θ_w – температура на поверхні елементу,

α – ефективний коефіцієнт теплообміну.

При реалізації спрощеної інженерної методики за даними стандарту [58] ефективний коефіцієнт теплообміну має враховувати теплові потоки через поверхню елементів за рахунок конвекції та теплового випромінювання газу та нагрітих поверхонь у приміщенні. За таких умов коефіцієнт теплообміну дорівнює:

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_K, \quad (3.6)$$

де α_p – коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

Використовуючи такий підхід та рекомендації [58], складові ефективного коефіцієнту теплообміну за формулою (3.6) мають визначатись за умов застосування таких виразів:

$$\text{обігрівна поверхня} - \alpha_K = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad \alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta_w^4 - \theta_p^4}{\theta_w - \theta_p}. \quad (3.7)$$

де $\varepsilon_c = 0.8$ – ступінь чорноти поверхні конструктивних елементів колони;
 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К) – константа Стефана-Больцмана.

Зміна температури за часом у приміщенні із пожежою визначається за стандартною температурною кривою згідно з формулою (2.1). Такий температурний вплив є номінальним, тобто таким, що не враховує причин виникнення пожежі, типу та розташування пожежного навантаження, конфігурації та проємів приміщення, роботи систем автоматичного пожежогасіння, тощо.

Початкова температура матеріалу дерев'яної колони та оточуючого середовища $\theta_0 = 20$ °С.

Теплофізичні характеристики деревини приймаються за рекомендаціями ДСТУ Б.Н. EN 1995-1-2: 2012 Eurocode 5 (IDT) [58].

Коефіцієнт теплопровідності та теплоємність деревини визначаються температурними залежностями, представленими кусково-лінійними функціями, вигляд яких поданий на рисунку 3.15.

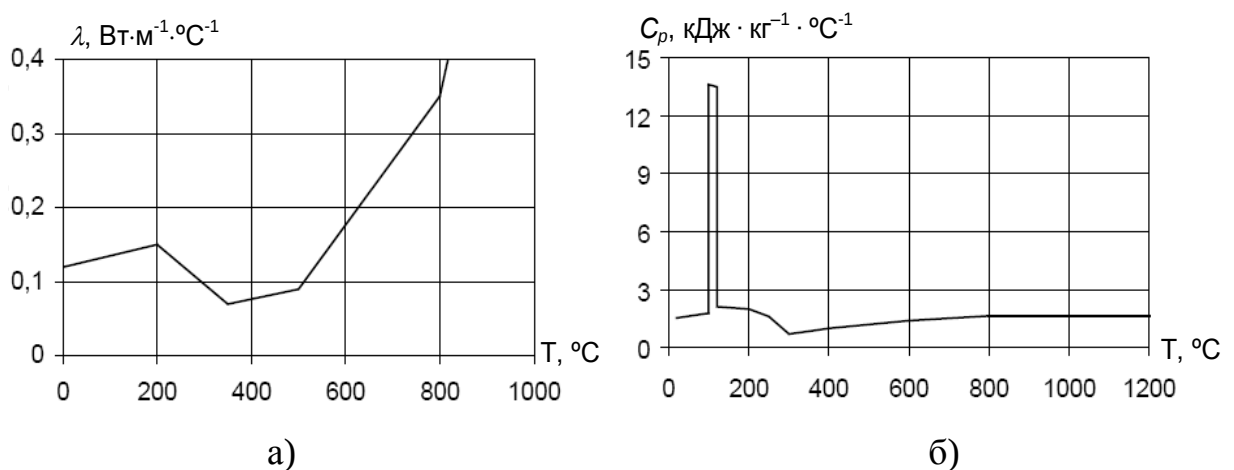


Рисунок 3.15 – Теплофізичні характеристики деревини: графік коефіцієнту теплопровідності (а); графік питомої теплоємності (б)

Вузлові точки для побудування графіків на рисунку 3.15 наведені у таблиці 3.9. У таблиці 3.9 також наведені дані щодо густини деревини.

Таблиця 3.9 – Теплофізичні характеристики деревини (сосна конструкційна)

Коефіцієнт теплопровідності		Об'ємна питома теплоємність		Густина, ρ , кг/м ³
θ , °C	$\lambda(\theta)$, Вт/(м·°C)	θ , °C	$c_p(\theta) \cdot \rho$, Дж/(м ³ ·°C)	
0	0.12	0	1530	530
200	0.15	99	1770	
350	0.07	100	13600	
500	0.09	120	13500	
800	0.35	121	2120	
1200	1.5	200	2000	
		250	1620	
		300	710	
		350	850	
		400	1000	
		600	1400	
		800	1650	
		1200	1650	

Інші дані щодо теплофізичних властивостей матеріалів зразку наведені у табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Теплофізичні характеристики супутніх матеріалів колони

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$, Вт/(м·°C)	Питома теплоємність, $c_p(\theta)$ · Дж/(м ³ ·°C)	Густина, ρ , кг/м ³
Повітря [84]		
0,0257	$\rho \cdot 1005$	1.29
Хром-алюмель дрітків термопар [84]		
$\lambda = 90,4 - 64,3$ при $20\text{ °C} \leq T \leq 800\text{ °C}$ $\lambda = 64,3 - 75,6$ при $800\text{ °C} < T \leq 1200\text{ °C}$	$c_p = 443,6 - 591$ при $20\text{ °C} \leq T \leq 600\text{ °C}$ $c_p = 591 - 524$ при $600\text{ °C} < T \leq 700\text{ °C}$ $c_p = 524 - 543$ при $700\text{ °C} < T \leq 900\text{ °C}$ $c_p = 562$ при $900\text{ °C} < T \leq 1200\text{ °C}$	8900

Параметри граничних умов наведені у табл. 3.11. Величини даних параметрів приймалися з огляду на рекомендації других частин Eurocode 1 та Eurocode 5 [57, 58].

Таблиця 3.11 – Параметри граничних умов для фрагменту дерев'яної колонни

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	α_c	Вт/(м ² °C)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	ε		0,8	

3.4.2. Чисельний метод розв'язку задачі теплопровідності

При застосуванні методу кінцевих елементів рівняння теплопровідності (3.4) записується у такому наближеному вигляді [83]:

$$[C_e] \{\theta_e\} + [K_e] \{\theta_e\} = \{Q_e\}, \quad (3.8)$$

де $[C_e] = \rho \cdot C_p \int_V \{N\} dV$ – матриця теплоємності кінцевого елемента (КЕ);

$[K_e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$ – матриця теплопровідності КЕ;

$[B] = \{L\} \{N\} \theta$ – матриця розподілення температури у просторі, який обмежується границями КЕ;

$\theta = \{N\}^T \{\theta_e\}$ – поточна температура у просторі, який обмежується границями КЕ;

$\{\theta_e\}$ – вектор вузлових температур КЕ;

$[D] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$ – матриця теплопровідності;

$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$ – вектор диференціального оператора;

$\{Q_e\} = q_w \int_s \{N\} ds$ – матриця теплових потоків на границях КЕ;

$\{N\}$ – вектор геометрії форми поточного кінцевого елемента, який визначає інтерполяційні функції у просторі, який обмежується границями КЕ.

Систему нелінійних рівнянь у матричному вигляді для об'єднання КЕ у ансамбль при розв'язку задачі теплопровідності у нелінійній постановці має бути записана у такому вигляді:

$$[K]\{\theta\} = \{Q_e\}, \quad (3.9)$$

де $[K]$ – еквівалентна матриця теплопровідності, що залежить від об'ємної теплоємності й коефіцієнта теплопровідності матеріалу;

Вектор для узагальнення правої частини рівняння (3.9) має бути записаний у вигляді виразу:

$$\{P(\theta)\} = \{Q_e\}, \quad (3.10)$$

де $\{P(\theta)\}$ – вектор внутрішніх вузлових теплових потоків, визначуваний за густиною теплових потоків елемента.

Для рішення записаного рівняння застосовується ітераційний метод Ньютона - Рафсона [78 - 83]. Шляхом проведення послідовних ітерацій відбувається пошук мінімуму квадратичної нев'язності:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q_e\} - \{P(\theta)\} \rightarrow \{0\}. \quad (3.11)$$

У результаті застосування скорочених рядів Тейлора для представлення залишкового вектора нев'язності за алгоритмом здійснення методу Ньютона - Рафсона система рівнянь (3.9) може бути записана у лінеризованому вигляді:

$$[K_T^{(i-1)}]\{\Delta\theta_e^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{P^{(i)}\}, \quad (3.12)$$

де $\{Q^{(i)}\}$ – вектор вузлових теплових потоків, що розраховується при встановленні значень вектора зовнішнього заданого теплового потоку $\{Q_{0n}\}$ і еквівалентної матриці теплопровідності $[K]$; $\{\bar{P}\}$ – еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, для обчислення членів еквівалентної матриці теплопровідності, визначувані шляхом чисельного інтегрування за часом вектора $\{\Delta\theta^{(i)}\}$ методом Ейлера. При цьому виконуються рівноважні ітерації ($i = 1, 2, 3, \dots$), у результаті чого визначаються нові значення температур на кожній ітерації з виразу:

$$\{\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i-1)}\} + \{\Delta\theta^{(i)}\}. \quad (3.13)$$

Послідовні ітерації мають виконуватися поки не досягається збіжність при врахуванні встановленого значення точності (0.1%).

У рівнянні (3.12) компоненти матриці $[K_T]$, визначаються за виразом:

$$[K_T^{(i-1)}] \equiv \left(\frac{d\{\Phi\}}{d\{\theta\}} \right)_{i-1}. \quad (3.14)$$

Розкладання вектора $\{\Phi\}$ у скорочений ряд Тейлора має такий вигляд:

$$\{\Phi^{(i)}\} \cong \{\Phi^{(i-1)}\} + [K_T^{(i-1)}] \{\Delta\theta^{(i)}\}, \quad (3.15)$$

де $\{\Delta\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i)}\} - \{\theta^{(i-1)}\}$ – вектор приращення збільшення температури для визначення поточного наближення при виконанні наступної ітерації.

При здійсненні чисельного інтегрування за часом вектора $\{\Delta\theta^{(i)}\}$ методом Ейлера використовується вираз:

$$\{\theta_{n+1}\} - \{\theta_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\dot{\theta}_n\} + \Delta t_n \zeta \{\dot{\theta}_{n+1}\}, \quad (3.16)$$

де Δt_n – крок інтегрування за часом;

ζ - параметр Ейлера, рівний 0,5, що означає реалізацію неявної обчислювальної схеми Кранка - Николсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності $[K]$ визначається з виразу:

$$[K] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [C_e] + [K_e], \quad (3.17)$$

Для поточного визначення вектору $\{Q(\theta)\}$ використовується формула:

$$\{Q_n(\theta)\} = \{Q_e\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [C_e] \{\theta_n\} - [K_e] \{\theta_n\}. \quad (3.18)$$

3.4.3. Розрахункові схеми досліджуваної дерев'яної колони.

Згідно із розробленими методиками експерименту, які описані у II розділі дійсної роботи зразок встановлюється у вогневу піч разом із вимірювальною арматурою, у тому числі і у середині зразка. Улаштування зразка наведено на рисунках 2.4, 2.5, 2.8 та 2.9. На рисунку 3.16 наведена універсальна схема конструктивних елементів досліджуваних зразків дерев'яних колон для вогневих випробувань.

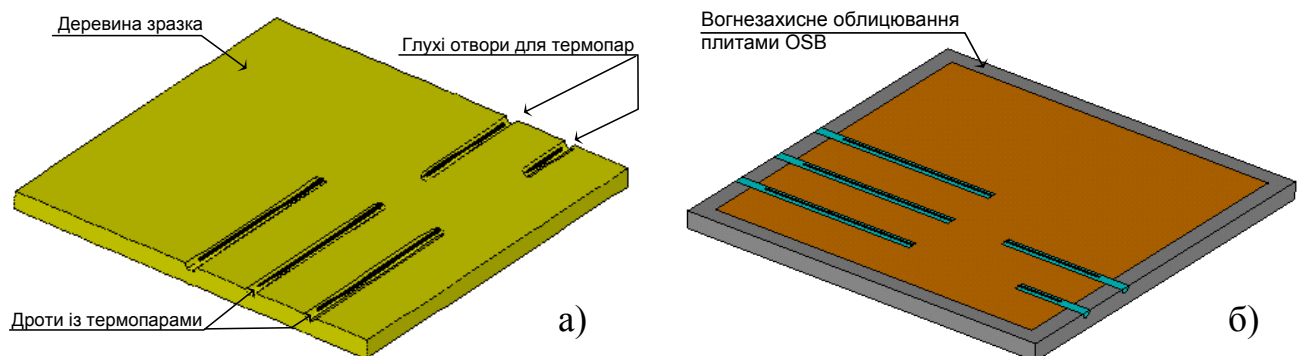


Рисунок 3.16 – Схема розташування конструктивних елементів у зразку для випробувань без вогнезахисту (а) та з вогнезахисним облицюванням (б)

При проведенні розрахунку була складена розрахункова схема для розв'язку теплотехнічної задачі, яка наведена на рисунку 3.17.



Рисунок 3.17 – Схема теплового впливу на зразок

3.4.4. Кінцево-елементні схеми дерев'яної колони для теплотехнічного розрахунку.

Для розв'язку задачі теплопровідності та задачі напружено-деформованого стану за методом кінцевих елементів нами був вибраний гексаедричний КЕ лагранжевого типу [88], форма якого представлена на рисунку 3.18.

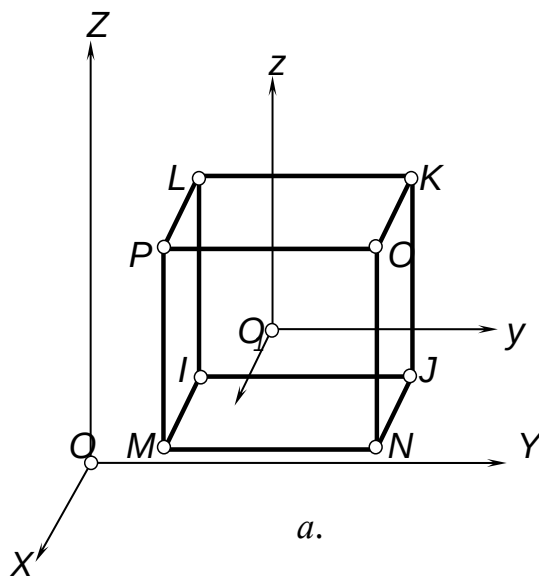


Рисунок 3.18 – Форма кінцевого елементу

Інтерполяційні поліноми Лагранжа визначаються виразами: [81 – 83]:

$$\begin{aligned} u_X &= \frac{1}{8}(u_{LX}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KX}(1-x)(1-y)(1-z) + K + u_{IX}(1-x)(1-y)(1-z)); \\ u_Y &= \frac{1}{8}(u_{LY}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KY}(1-x)(1-y)(1-z) + K + u_{IY}(1-x)(1-y)(1-z)); \\ u_Z &= \frac{1}{8}(u_{LZ}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KZ}(1-x)(1-y)(1-z) + K + u_{IZ}(1-x)(1-y)(1-z)); \end{aligned} \quad (3.19)$$

Кінцево-елементна схема дерев'яного зразку для випробувань у відповідності з рисунками 3.16 – 3.18 представлена на рисунку 3.19. На даному рисунку різними кольорами показані типи матеріалів, з яких він виготовлений.

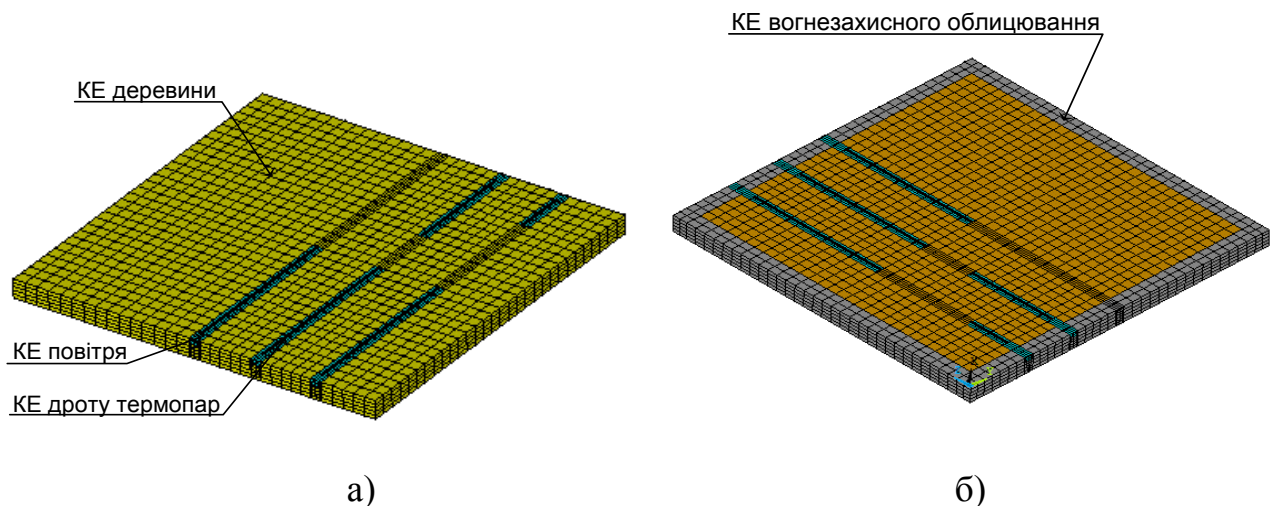


Рисунок 3.19 – Кінцево-елементна схема зразків для випробувань без вогнезахисту (а) та з вогнезахисним облицюванням (б) при вирішенні теплотехнічної задачі

3.4.5. Розрахункові схеми досліджуваної дерев'яної колони

В результаті вирішення теплотехнічної задачі [89] отримано температурні розподілення, які наведені на рисунках 3.20 – 3.21.

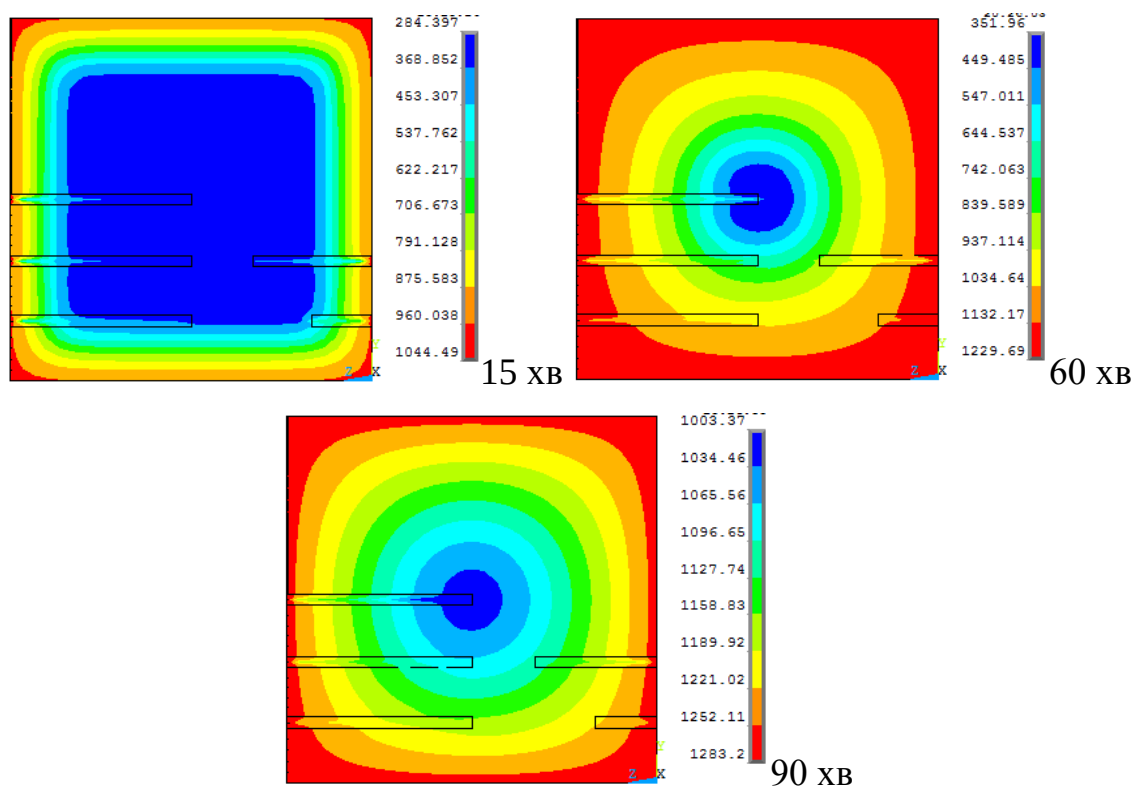


Рисунок 3.20 – Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у частині перерізу зразка без вогнезахисту

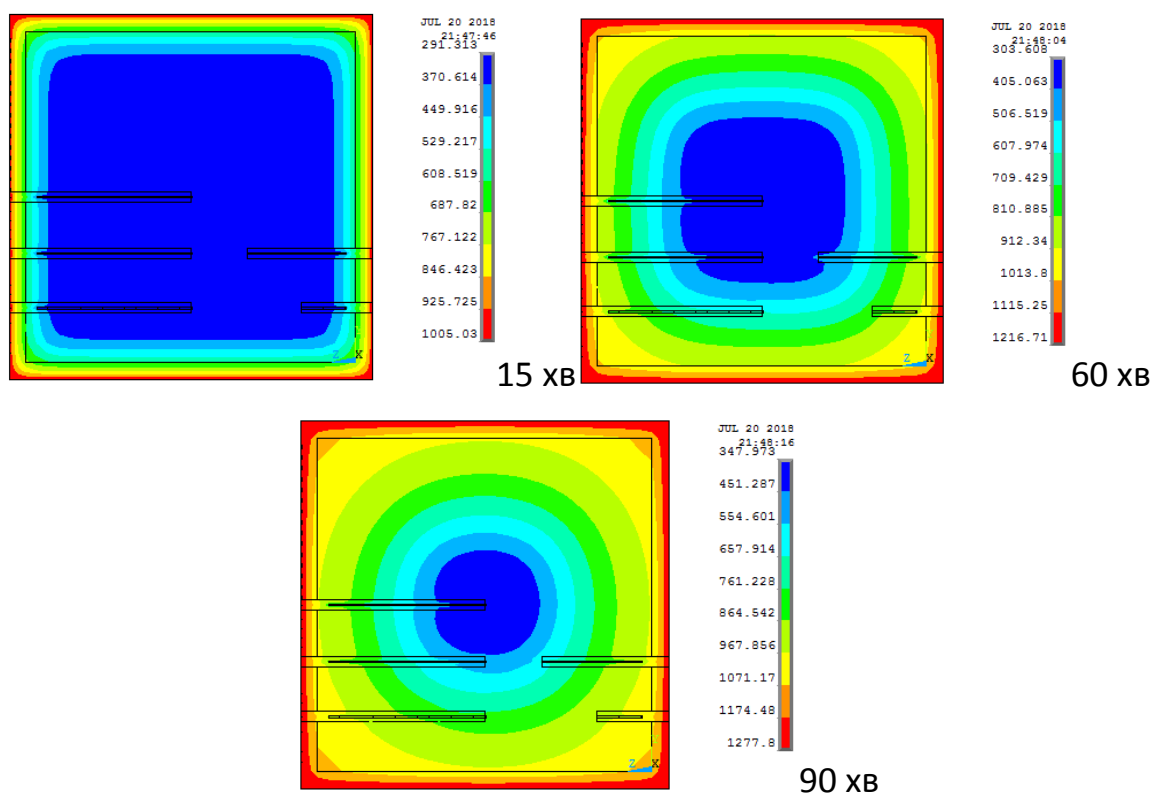


Рисунок 3.21 – Результати вирішення теплотехнічної задачі: температурні розподілення у перерізі зразка для випробувань з вогнезахисним облицюванням

На розподілах рисунку 3.20 та рисунку 3.21 видно, що наявність глухих отворів у зразку дещо викривляє лінії ізотерм, проте, таке викривлення є локальним. Аналізуючи розподіли температури по поперечному перерізу зразків, видно, що викривлення ізотерм не впливає на загальну картину і температурні розподіли є загалом симетричними і відображають реальну картину розподілень температури у даному зразку. Величина температури прогрівання дещо перевищує значення температур, отриманих у ході експерименту, однак, таке перевищення є незначним і пояснюється відмінністю структури та властивостей зразків, підданих випробувань, до усереднених властивостей деревини, що використана як еталонна для теплофізичних властивостей, рекомендованих у ДСТУ Б.Н. EN 1995-1-2: 2012 Eurocode 5 (IDT).

Для більш детального аналізу були вивчені режими прогріву зразків для випробувань із відповідними конструктивними елементами, отриманих у результаті випробувань, та режими прогріву у тих же контрольних точках без конструктивних елементів. Результати розрахунку даних температурних режимів наведені на рисунку 3.22.

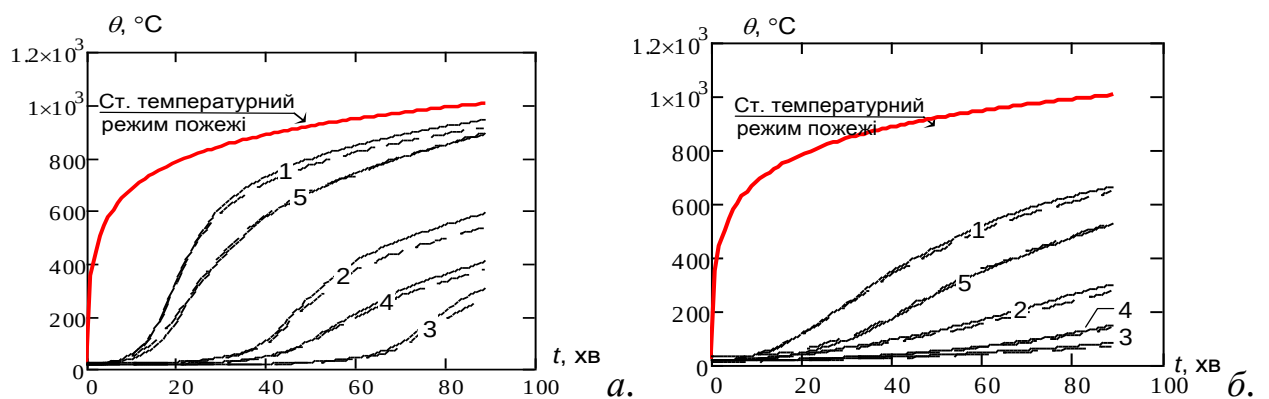


Рисунок 3.22 – Графік температурних режимів прогрівання зразку без вогнезахисту (а) та з вогнезахисним облицюванням (б) розрахованих для зразка з відповідними конструктивними елементами (суцільна лінія) та без конструктивних елементів (пунктирна лінія): 1 – у контрольній точці першої термопар, 2 – у контрольній точці другої термопар, 3 – у контрольній точці третьої термопар, 4 – у контрольній точці четвертої термопар, 5 – у контрольній точці п'ятої термопар

Графіки на рисунку 3.22 показують, що різниця між значеннями температур у зразку із реальними конструктивними особливостями та значеннями температур у зразках без таких особливостей відрізняються не більше за 30 °С при максимальному відхиленні.

Для більш детального вивчення адекватності отриманих результатів при вимірюванні температур у ході проведення експерименту були проаналізовані статистичні критерії. В якості таких критеріїв використані значення відносного, середньоквадратичного відхилень та критерію Фішера [90]. Розрахунок критерію Фішера проводився за формулою (3.20):

$$F_c = \frac{S_{ad}^2}{S_{cp}^2} \leq F(\nu_1, \nu_2, \alpha), \quad (3.20)$$

де S_{ad}^2 - дисперсія адекватності,

S_{cp}^2 - дисперсія відтворюваності експериментальних даних, що визначається за формулою (3.22),

$\nu_1 = d$ – число ступенів вільності чисельника,

$\nu_2 = n - 1$ – число ступенів вільності знаменника,

$\alpha = 0.05$ – рівень значущості,

n – кількість вимірювань в одному експерименті,

d – кількість експериментів.

Дисперсія адекватності визначається за формулою (3.21):

$$S_{ad}^2 = \frac{d}{n-1} \sum_{k=1}^n \left[\frac{\bar{y}_k^e - y_k}{\min(|\bar{y}_k^e|, |y_k|)} \right]^2, \quad (3.21)$$

де $\bar{y}_k^e$ - середнє значення вимірюваної величини за вибіркою,

y_k – поточне розрахункове значення.

Дисперсія відтворюваності експериментальних даних визначається за формулою (3.22):

$$S_{\text{сп}}^2 = \frac{1}{d(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^d \left[\frac{y_{kj}^e - \bar{y}_k^e - \delta_{\text{вим}}}{\bar{y}_k^e} \right]^2 \quad (3.22)$$

де, y_{kj}^e – поточне експериментальне значення з вибірки;

$\delta_{\text{вим}}$ = допустима похибка вимірювання

Результати проведеного аналізу статистичних критеріїв наведені у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Статистичні параметри, отримані при дослідженні адекватності результатів розрахунку температури у зразках

Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{сп}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. [9].	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
5	90	5	450	0,17	0,094	0,553	1,01	4,5	11,9
5	90	5	450	0,19	0,096	0,505	1,01	4,2	10,6

Дані таблиці 3.12 показують, що отримані результати є адекватними, оскільки відносна похибка складає всього 4,5 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення.

3.5 Висновки за розділом

1. На основі проведених експериментальних досліджень визначено закономірності зміни температури у внутрішніх шарах досліджуваних зразків

дерев'яних колон в залежності від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом.

2. Визначено глибину обвугленої зони сторін квадратного перерізу досліджуваних зразків дерев'яних колон, а також відповідні швидкості їх обвуглювання. Побудовані графіки регресійних залежностей зміни глибини та швидкості обвугленого шару від часу вогневого випробування зразків.

3. На основі апроксимації отриманих результатів при проведенні експерименту шляхом нанесення контрольних точок вимірювання на Декартову систему координат здійснено моделювання обвугленої зони досліджуваних зразків дерев'яних колон за часові проміжки 15, 30, 60 та 90 хвилин.

4. Підтверджено припущення, що зростання температури в шарах дерев'яної колони в залежності від часу відбувається поступово і чим ближче до центру перерізу тим нижча температура. Встановлено, що при застосуванні плитного вогнезахисту прогрівання відбувається повільніше і прямо пропорційне до товщини вогнезахисту, що впливає на вогнестійкість дерев'яних колон.

5. Встановлено, що зона обвуглювання колон з плитним вогнезахистом OSB відрізняється від зони обвуглювання без вогнезахисту, а при застосуванні вогнезахисту на основі плит OSB в два шари обвуглення починається тільки після 30 хвилини з моменту початку вогневих випробувань.

6. Після проведеного аналізу адекватності результатів вимірювання температури у зразках із даною конструкцією встановлено, що отримані результати є адекватними, оскільки відносна похибка складає всього 4,5 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення.

РОЗДІЛ 4 ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПЕРЕРІЗАХ ДОСЛІДЖУВАНИХ ЗРАЗКІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

4.1. Метод інтерполяції температурних полів у перерізі досліджуваного зразка дерев'яної колони за результатами вимірювань температури під час їх випробувань

4.1.1. Апроксимація температурних розподілень у перерізі досліджуваних зразків дерев'яних колон по лініям розташування термопар

Можна припустити, що вигляд температурних розподілень по лініям розташування термопар відповідає параболічним залежностям з огляду на дослідження, проведені у роботах [91 – 94]. За результатами досліджень наведених робіт дані залежності можуть бути апроксимовані за виразом, що має такий загальний вигляд:

$$\theta(i)|_{x \leq 0} = \theta_0 + (\theta_{\max} - \theta_0) \left[\frac{i}{n} \right]^q, \quad (4.1)$$

де θ_0 – мінімальна температура, °C;

$\theta_{\max}$ – максимальна температура, °C;

i – номер контрольної точки в перерізі;

n – кількість контрольних точок;

q – показник ступеня параболи.

Варіювання показника ступеня параболи q апроксимуючого виразу типу (4.1) за умови мінімізації середньоквадратичної нев'язності дозволяє отримати його у вигляді, що найбільш точно відтворює результати вимірювань. Цільовий функціонал має вигляд, поданий нижче [91 – 94].

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [\theta_{iM} - \theta_{iE}]^2 \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

де m – кількість просторово-часових контрольних точок;

θ_{iE} , θ_{iM} , - експериментальне та модельне значення температури в i -тій контрольній точці.

Для вирішення задачі пошуку мінімуму функціоналу (4.2) у роботах [91 – 94] пропонується використовувати метод покрокового спуску. Блок-схема даного алгоритму подана на рисунку 4.1.

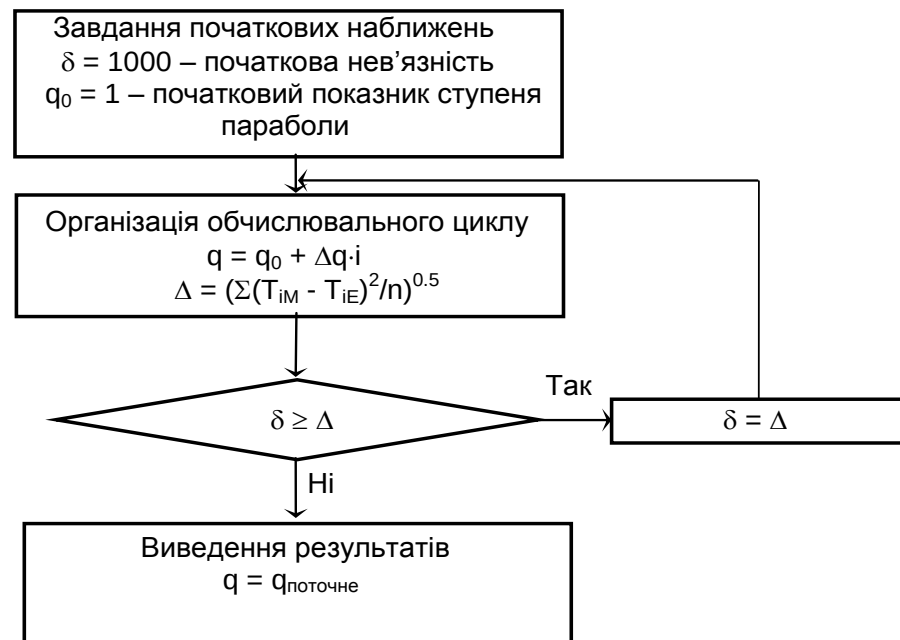


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритму визначення апроксимуючого поліному

Використовуючи результати вимірювань, які подані у попередньому розділі були проведені розрахунки залежності температури від відстані по лінії розташування термопар за запропонованим алгоритмом. Після проведення розрахунків були знайдені означені залежності у вигляді виразу (4.1), за якими побудовані графіки температурних розподілень, подані на рисунку 4.2. Можна побачити, що графіки на рисунку 4.2. достатньо точно

відтворюють показники температури, які були отримані у результаті експериментальних досліджень.

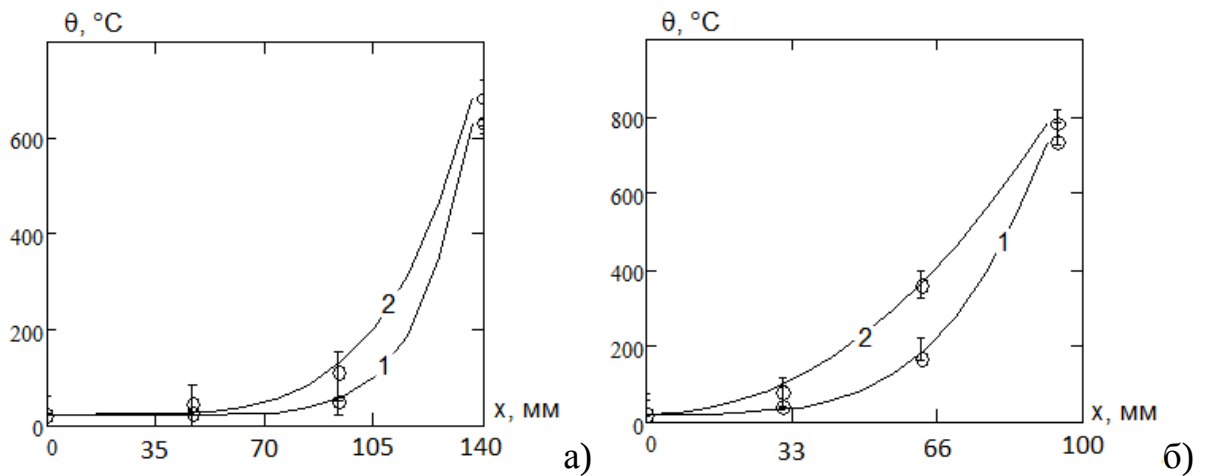


Рисунок 4.2 – Результати апроксимації температурного розподілення по діагональній лінії розташування термопар (а) та по горизонтальній лінії розташування термопар (б) у різні моменти часу розвитку пожежі: 1 – 15 хв; 2 – 30 хв

Температура на границі перерізу зразка дерев'яної колони визначена з використанням формули для завдання ГУ III роду (3.5). Дана формула записується при наближенні похідною за допомогою кінцевої різниці температур у вигляді [95 – 97]:

$$\lambda \left(\frac{\theta_w + \theta_1}{2} \right) \frac{\theta_w - \theta_1}{\Delta x} - \alpha_k (\theta_p - \theta_w) - \varepsilon_c \sigma (\theta_p^4 - \theta_w^4). \quad (4.3)$$

Даний вираз розглядається як нелінійне рівняння по відношенню до величини θ_w температури поверхні фрагменту. Дане рівняння вирішується методом простих ітерацій.

4.1.2. Адекватність результатів апроксимації температури по лініям розташування термопар

Адекватність даних, що отримані, визначено за декількома критеріями. Рекомендації в роботах [91 – 94, 98] в якості критеріїв адекватності пропонують використовувати абсолютне та відносне відхилення, а також F-критерій (критерій Фішера), який визначається за формулами (3.20), (3.21), (3.22).

В таблиці 4.1 подані результати розрахунків за описаною методикою.

Таблиця 4.1 – Статистичні параметри при дослідженні адекватності результатів апроксимації температурних розподілів у досліджуваних зразках дерев'яних колон по лініям розташування термопар

Час експонування, хв.	Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{сп}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію. F	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, $^{\circ}\text{C}$
90	90	450	3	1350	0,009	0,017	0,889	1,01	5,1	15,41

4.1.3. Інтерполяція температурних розподілів у перерізі досліджуваних зразків дерев'яних колон

При проведенні інтерполяції за фронтальними січними площинами поверхні, що утворена температурним полем допускається, що лінія перетину січної площини та поверхні поля є також параболою згідно із роботами [91, 92], як показано на рисунку 4.3.

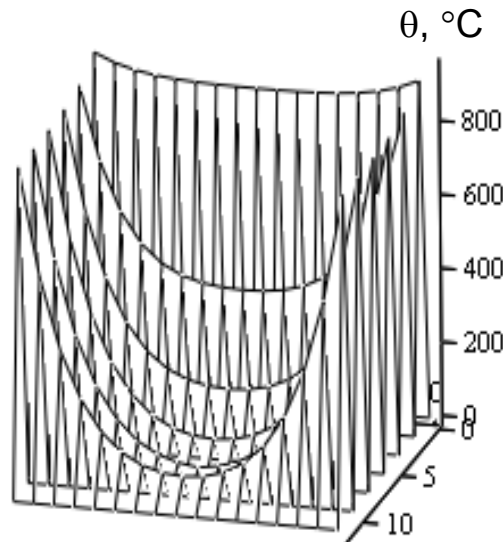


Рисунок 4.3 – Вигляд фронтальних січних площин температурних розподілів у перерізі колони 300×300 у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі

Інтерполяція проводиться з використанням таких формул:

$$\begin{aligned}
 \theta g_{k,i,j} &= \theta 0_k + (\theta g \max_k - \theta 0_k) \left[\frac{j}{n} \right]^{Qg_k} \quad \text{при } i = 0, j \neq 0; \\
 \theta v_{k,i,j} &= \theta 0_k + (\theta v \max_k - \theta 0_k) \left[\frac{i}{n} \right]^{Qv_k} \quad \text{при } i \neq 0, j = 0; \\
 \theta d_{k,i,j} &= \theta 0_k + (\theta d \max_k - \theta 0_k) \left[\frac{i}{n} \right]^{Qd_k} \quad \text{при } k = j \neq 0; \\
 \theta 1_{k,i,j} &= \theta g_{k,j} + (\theta s g_{k,j} - \theta g_{k,j}) \left[\frac{i}{n} \right]^{Qtg_{k,j}} \quad \text{при } i \neq 0, j \neq 0; \\
 \theta 2_{k,i,j} &= \theta v_{k,i} + (\theta s v_{k,i} - \theta v_{k,i}) \left[\frac{j}{n} \right]^{Qtv_{k,i}} \quad \text{при } j \neq 0, i \neq 0,
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

де θg , θv , θd – температури головної діагоналі, перших стовбчика та рядка матриці температурного поля;

$\theta 0$ – перша точка нульового рядка та нульового стовбчика;

θ_{t1} , θ_{t2} – температури, що визначаються окремо: для стовпчиків, для рядків матриці температурного поля;

Q_g , Q_v , Q_d – показники ступеня параболи, які знаходяться за алгоритмом, поданим на рисунку 4.1;

Q_{tg} , Q_{tv} – показники ступеня параболи, які апроксимують поверхню за стовбчиками та рядками окремо, які визначаються для кожного стовбчика або рядка за алгоритмом, що поданий на рисунку 4.1.

Після порядкового та постовбчикowego складання двох окремих матриць температур обчислюється середнє значення для кожної вузлової точки і будується матриця температурного розподілу у кінцевому вигляді.

У результаті проведених розрахунків за розробленим алгоритмом були побудовані температурні розподіли для досліджуваних зразків колон 200×200 з вогнезахисним облицюванням з листів OSB, використовуючи в якості початкових даних результати експерименту, що подані на рисунках 3.2 – 3.5. При цьому врахована дискретність контрольних точок вимірювання згідно із схемою, яка подібна до схеми, наведеної на рисунку 3.16.

4.2. Результати інтерполяції температур у перерізах досліджуваних зразків дерев'яних колон, підданих випробуванням

Використовуючи розроблений алгоритм, були визначені розподілення температури у перерізі зразків, що є фрагментами колон із вогнезахистом на основі результатів проведених температурних вимірювань під час їх вогневих випробувань. Температурні розподіли були побудовані у вигляді поверхонь та ізотерм [99] у відповідних перерізах для кожного моменту часу випробувань. На рис. 4.4 – рис. 4.6 подані температурні розподілення досліджуваних зразків дерев'яних колон з вогнезахистом у вигляді облицювання плитами OSB та без нього, які були отримані за запропонованим методом інтерполяції.

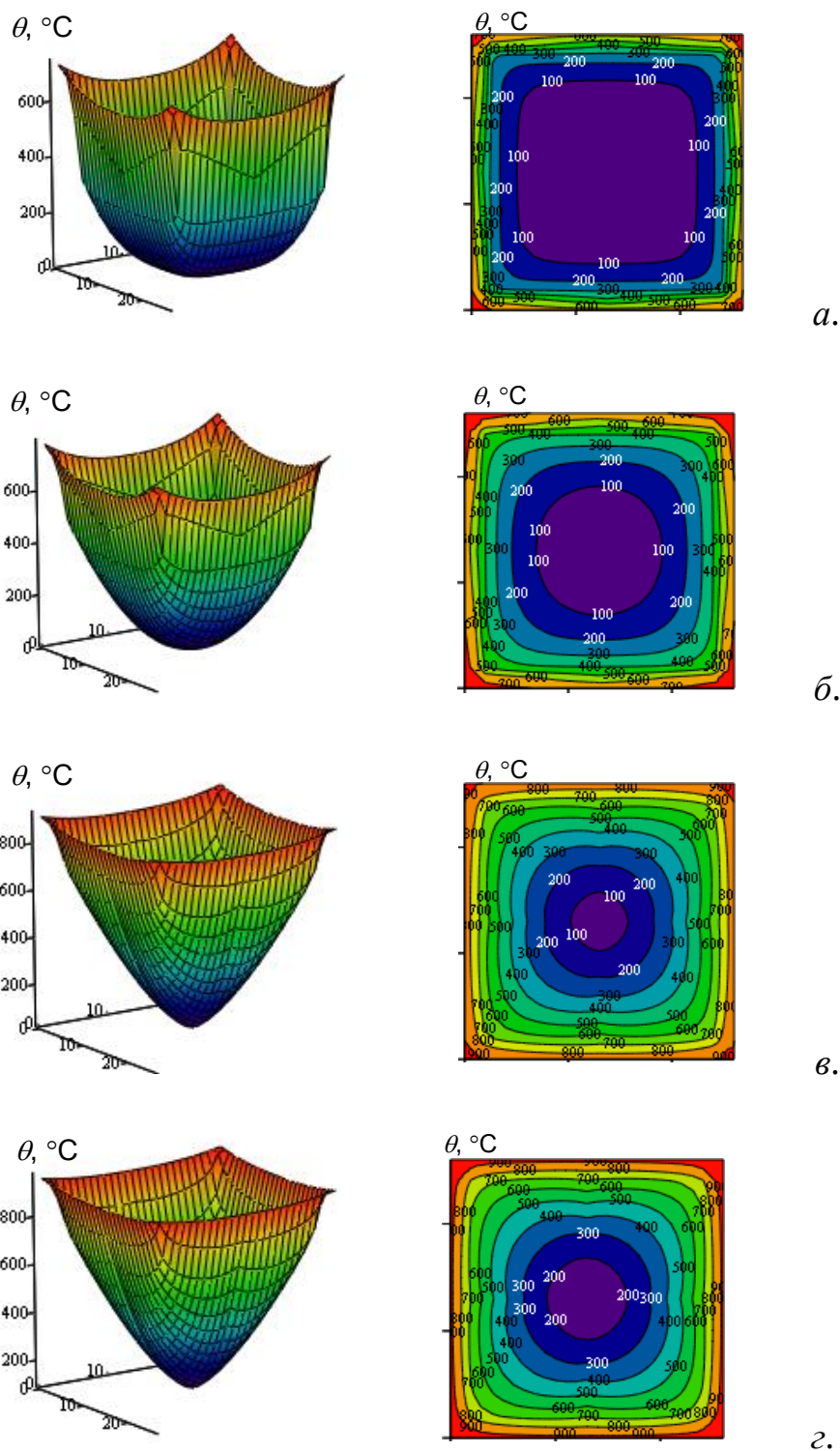


Рисунок 4.4 – Температурні розподіли у перерізі досліджуваного зразка дерев'яної колони 200×200 без вогнезахисного облицювання у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за запропонованим методом інтерполяції: *а* – на 15 хв; *б* – на 30 хв; *в* – на 60 хв; *г* – на 90 хв

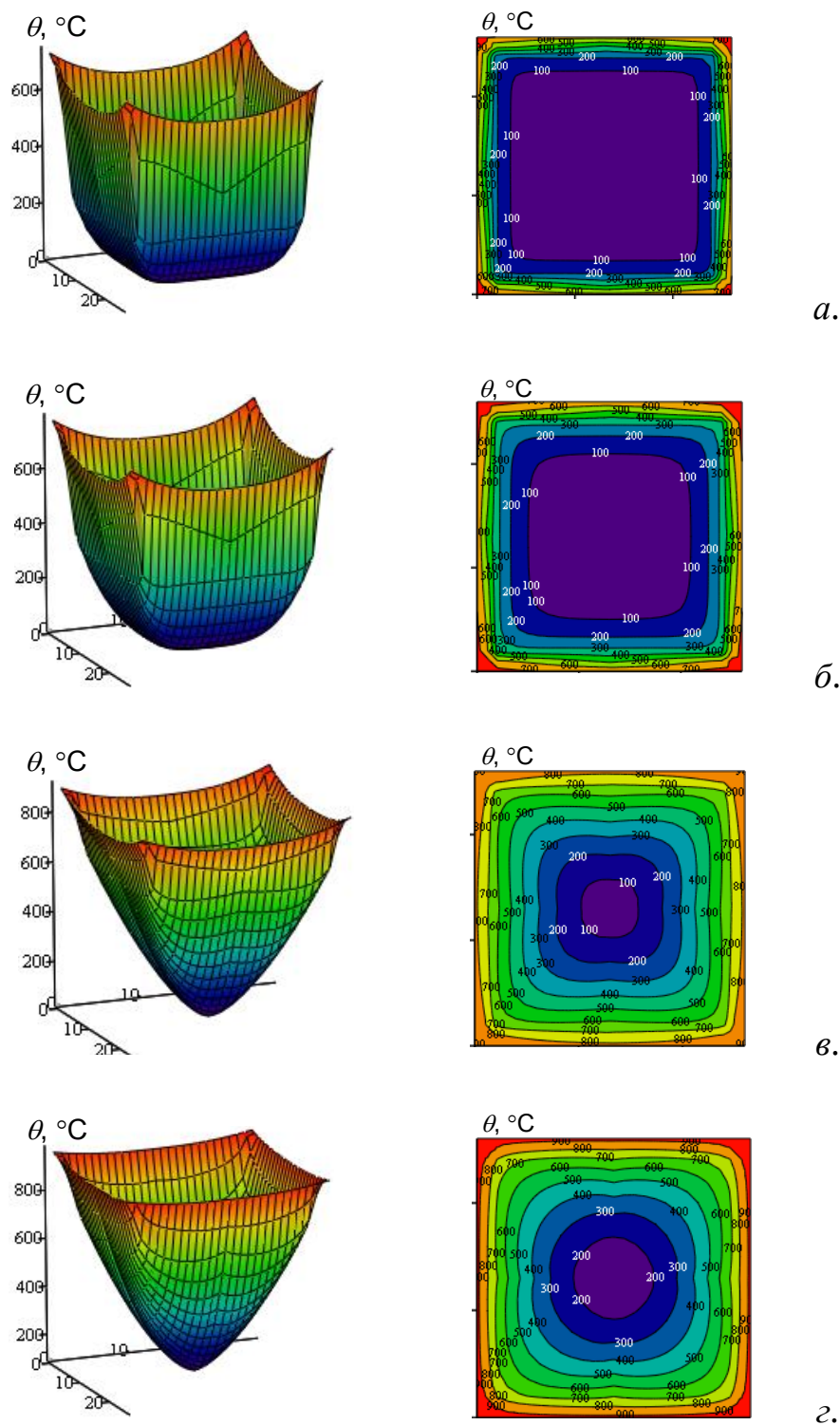


Рисунок 4.5 – Температурні розподіли у перерізі досліджуваного зразка дерев'яної колони 200×200 із вогнезахисним облицюванням в один шар у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за запропонованим методом інтерполяції: *а* – на 15 хв; *б* – на 30 хв; *в* – на 60 хв; *з* – на 90 хв

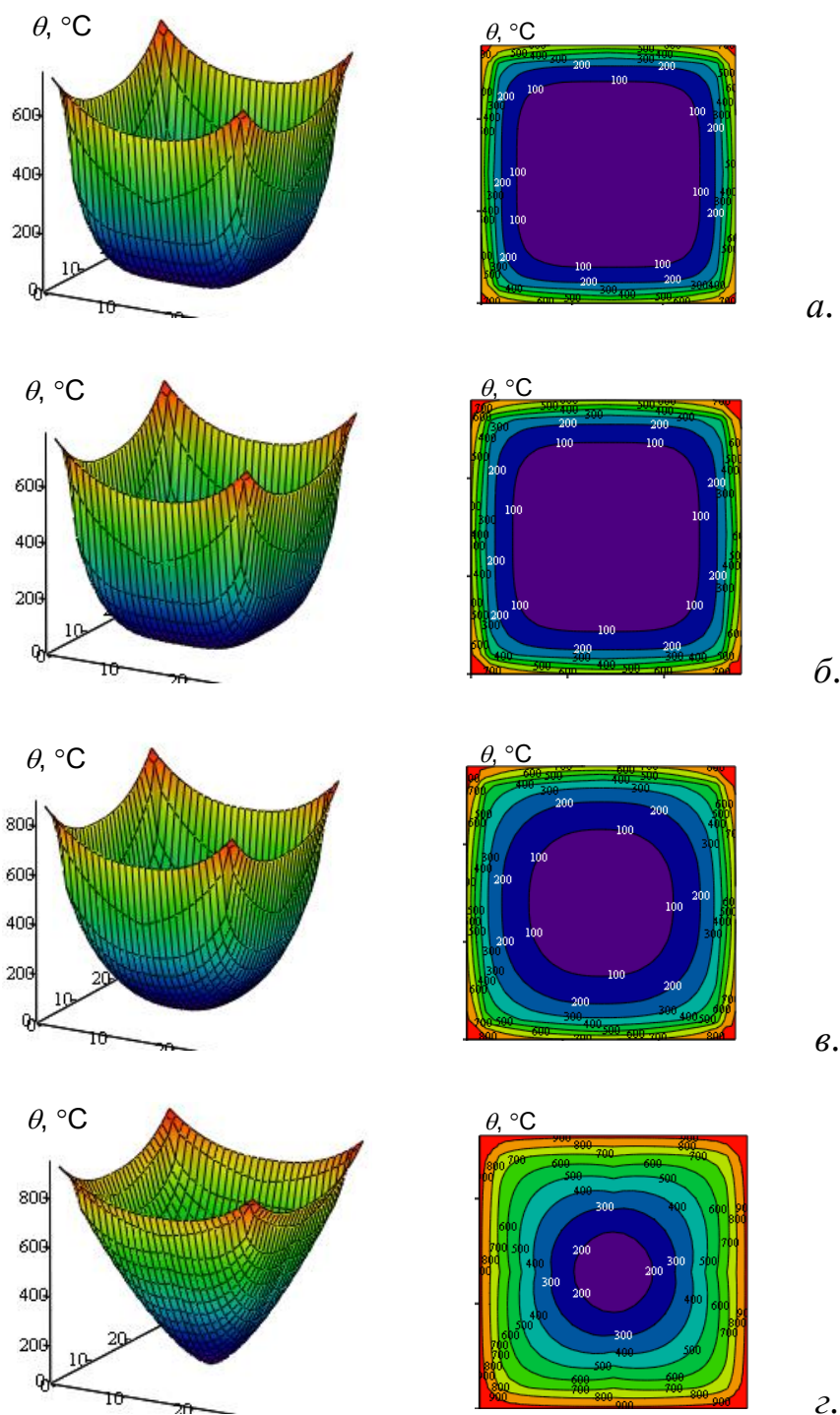


Рисунок 4.6 – Температурні розподіли у перерізі досліджуваного зразка дерев'яної колони 200×200 із вогнезахисним облицюванням в два шари у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за запропонованим методом інтерполяції: *а* – на 15 хв; *б* – на 30 хв; *в* – на 60 хв; *г* – на 90 хв

Отримані розподіли мають замкнені ізотерми, що мають відповідну гладкість та сумісність, а також узгоджуються із формою таких розподілів, що отримані теоретичним шляхом.

Як можна побачити на рисунках із температурними розподіленнями прогрівання досліджуваних зразків дерев'яних колон із вогнезахистом відбувається із меншою швидкістю, що також підтверджує ефективність запропонованої вогнезахисної системи.

Також, з метою вивчення поведінки параметрів виразів для апроксимації температур вздовж ліній розташування термопар. На рисунку 4.7 наведені графіки залежностей показника ступеня виразів апроксимації температур вздовж горизонтальної та вертикальної контрольних ліній перерізу.

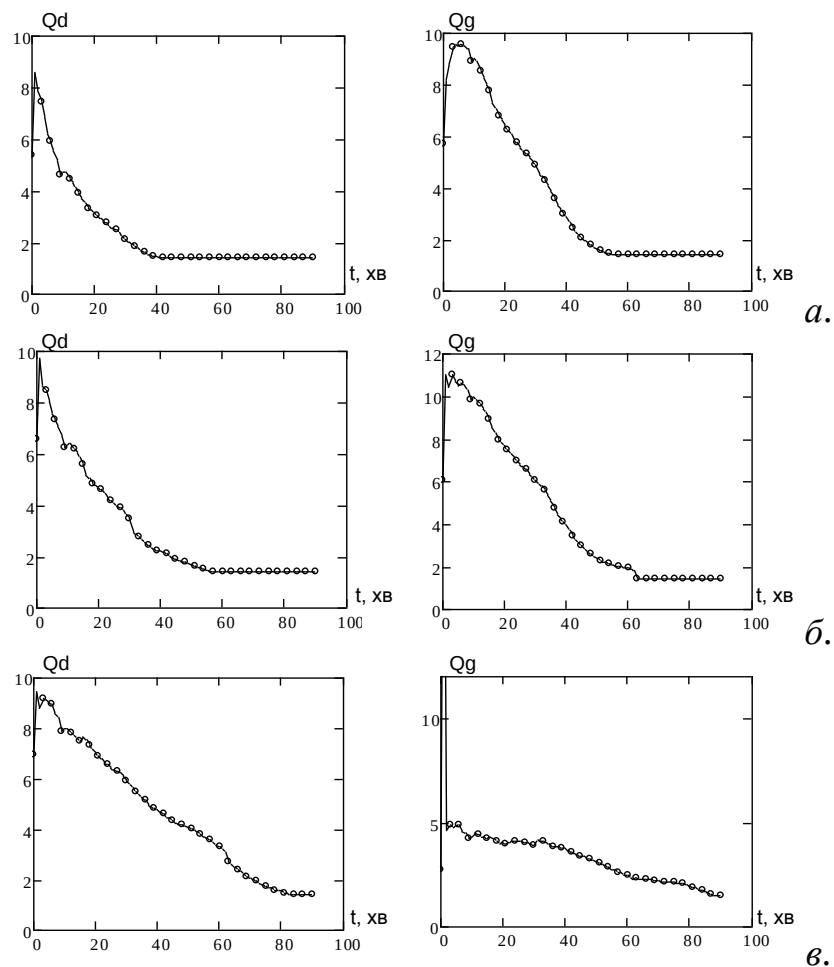


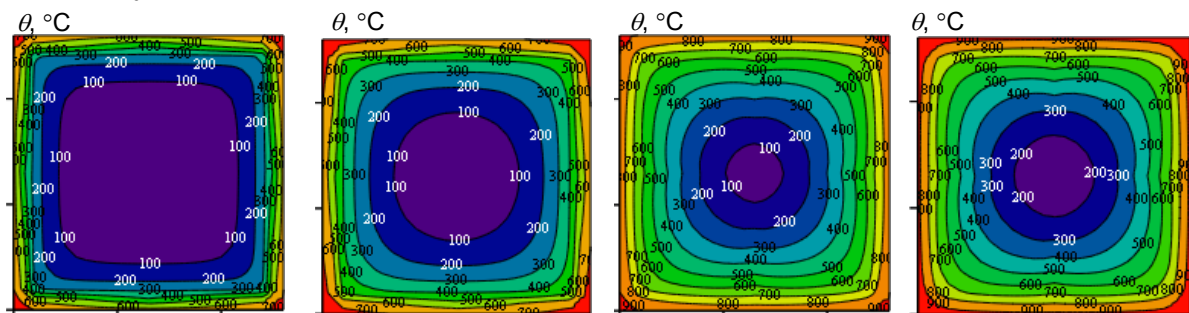
Рисунок 4.7 – Залежності показника ступеня апроксимуючих функціоналів (4.4) у залежності від часу випробування: *а* – без вогнезахисного облицювання; *б* – з одношаровим вогнезахисним облицюванням; *в* – з двошаровим вогнезахисним облицюванням

Графіки на рисунку 4.7 відповідають зменшенню часткових похідних другого порядку по координатам з причини уповільнення прогрівання зразку при його облицюванні плитами OSB.

4.3. Адекватність результатів апроксимації температури по перерізу зразків

Використовуючи математичний апарат для визначення температур у перерізі дерев'яних конструкцій за умов «стандартної» пожежі, який наведений у п. 3.4.1, були проведені розрахунки температури у перерізах досліджуваних зразків дерев'яних колон і порівняні із даними, які отримані у результаті апроксимації. На рисунку 4.8 наведені розподілення температури у перерізах зразків, що були визначені у результаті апроксимації температури за експериментальними даними, та розподілення температури, що визначені за результатами розв'язку теплотехнічної задачі.

Температурні розподіли, отримані на основі апроксимації за експериментальними даними



Температурні розподіли, отримані на основі вирішення теплотехнічної задачі

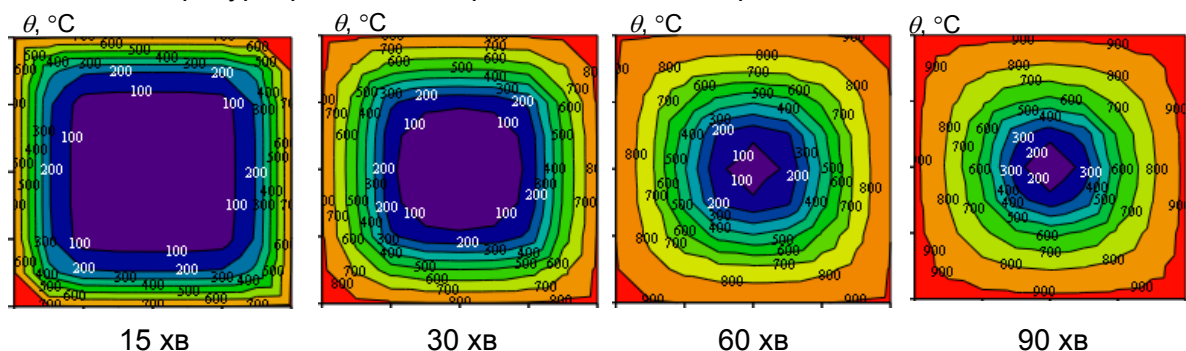


Рисунок 4.8 – Температурні розподіли у досліджуваних зразках дерев'яних колон без вогнезахисного облицювання, підданих вогневим випробуванням

Аналіз температурних розподілень, наведених на рис. 4.8, показав, що вони є схожими, особливо у період часу до 45 хв розвитку «стандартної» пожежі. Певна похибка пояснюється тим, що деревина має складну структуру і різний вміст води у порах. Теплофізичні характеристики деревини, наведені у рекомендаціях [58] розраховані на охоплення якомога більшої кількості випадків і дає завищені результати з урахуванням певного запасу. З огляду на це можна зазначити, що збіжність результатів є задовільною.

Для більш детального аналізу збіжності результатів були вивчені статистичні критерії адекватності отриманих результатів. Дані, отримані у ході такого аналізу наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Статистичні параметри при дослідженні адекватності результатів апроксимації температурних розподілів у досліджуваних зразках дерев'яних колон у порівнянні із теоретичними даними

Час експонування, хв.	Число ступенів вільності чисельника, ν_1	Число ступенів вільності знаменника, ν_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності, $S_{\text{сп}}^2$	Дисперсія адекватності, $S_{\text{ад}}^2$	Розрахункове значення F-критерію.	Табличне значення F-критерію.	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °C
90	90	450	3	1350	0,056	0,058	0.966	1,01	14,8	35,41

Дані таблиці 4.2 показують, що результати, отримані шляхом застосування запропонованого методу апроксимації на основі експериментальних вимірювань, є адекватними, оскільки критерій Фішера не перевищує табличного значення, а відносна похибка складає не більше 15%.

4.4. Моделювання процесу обвуглювання вогнезахищених зразків дерев'яних колон на основі результатів їх вогневих випробувань

При моделюванні обвуглювання досліджуваних зразків дерев'яних колон за основу взято гіпотеза про те, що обвуглена частина перерізу повинна залежати від його прогрівання до критичної температури. Враховуючи це, зона обвуглювання має бути обмежена ізотермою, відповідною критичній температурі, при якій відбувається 80 % – 90 % перетворення деревини на вугілля [76, 100 – 104].

Використовуючи регресійні залежності залежності, що визначені у таблицях 3.6 – 3.8, можна визначити за отриманими апроксимаційними функціоналами типу (4.1) для серединної горизонталі перерізу та його діагоналі. Критична температура обвуглювання може бути визначена як середнє значення її величин що отримуються за формулами [76]:

$$\begin{aligned}\theta_{g_{кр,i}} &= \theta_{0i} + (\theta_{gi} - \theta_{0i}) \left[\frac{0,5a - \beta_g \cdot t}{a} \right]^{Q_{gi}} \\ \theta_{d_{кр,i}} &= \theta_{0i} + (\theta_{di} - \theta_{0i}) \left[\frac{0,5a - \beta_d \cdot t}{a} \right]^{Q_{di}}, \\ \theta_{кр,i} &= 0,5(\theta_{d_{кр,i}} + \theta_{g_{кр,i}})\end{aligned}\tag{4.5}$$

По формулам (4.5) визначено середню температуру обвуглювання для зразків, підданим випробуванням. На рисунку 4.9 показані графіки залежності критичної температури від часу випробування з огляду на створені моделі швидкості обвуглювання деревини досліджуваних зразків дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього [76].

Аналізуючи графіки, подані на рисунку 4.9 [76], можна побачити що критична температура для досліджуваних зразків колон без вогнезахисту змінюється не так помітно, як вона змінюється для досліджуваних зразків дерев'яних колон із вогнезахисним облицюванням.

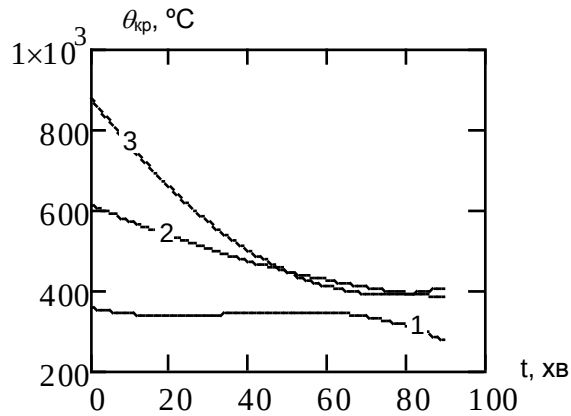


Рисунок 4.9 – Залежності критичної температури обвуглювання у залежності від часу випробування: 1 – без вогнезахисту; 2 – вогнезахисне облицювання в один шар; 3 – вогнезахисне облицювання у два шари

Значення температури обвуглювання має фізичну сутність лише для досліджуваного зразка колони без вогнезахисного облицювання, тому що поверхня такого зразка відразу відчуває тепловий вплив пожежі і починає відповідним чином обвуглюватися [76]. Ці значення відповідають численним експериментальним даним щодо обвуглювання незахищеної деревини різних дослідників, наведеним у роботі [58]. Згідно із цим температура обвуглювання складає 250 – 350 °C. Температура першої кривої на рисунку 4.9 відповідає цьому інтервалу. Стосовно інших двох кривих великі значення температур обвуглювання зумовлені наявністю вогнезахисного облицювання з іншими теплофізичними властивостями та властивостями щодо температури обвуглювання. Тому дана температура носить умовний характер і використовується тільки для побудови зон обвуглювання саме для квадратних колон з подібним вогнезахисним облицюванням [76].

Знайшовши критичні температури обвуглювання деревини змодельовано зони обвуглювання для зразків колон із вогнезахисном і без нього, підданих випробуванням. На рисунках. 4.10 – 4.12 [76] показана динаміка зміни обвугленої зони зразків дерев'яних колон, підданих випробуванням, що визначена за результатами моделювання.

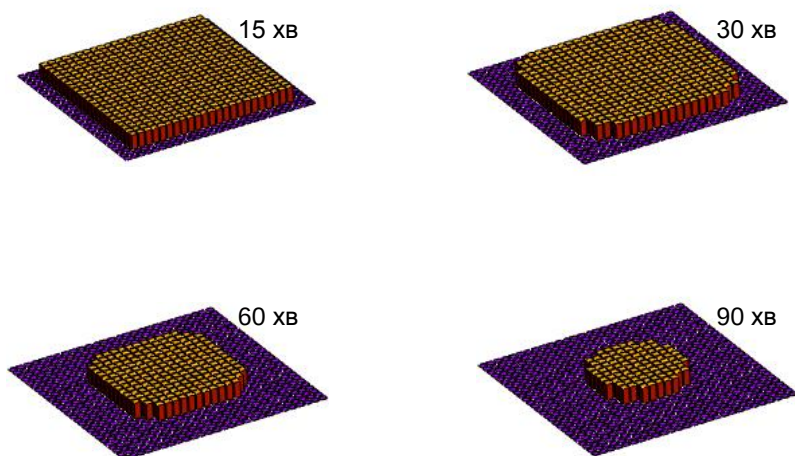


Рисунок 4.10 – Динаміка зміни обвугленої зони досліджуваного зразка без вогнезахисного облицювання

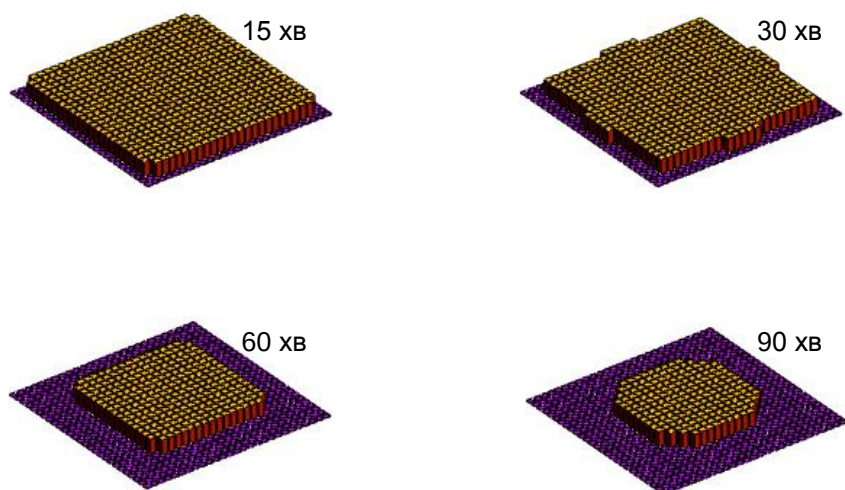


Рисунок 4.11 – Динаміка зміни обвугленої зони досліджуваного зразка із вогнезахисним облицюванням у один шар

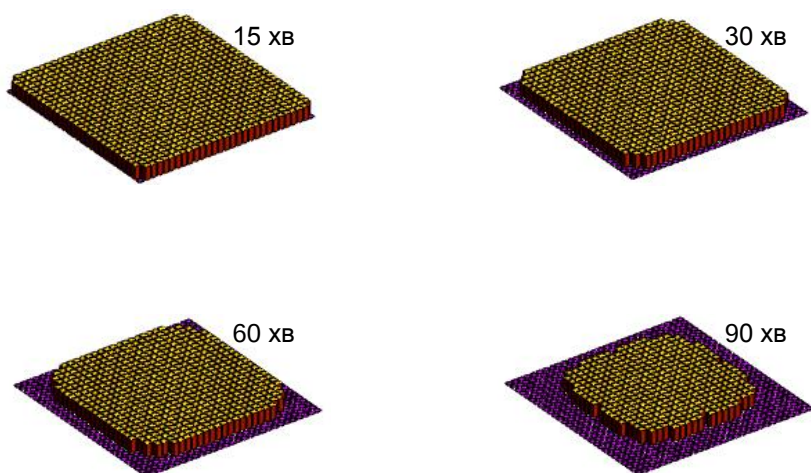


Рисунок 4.12 – Динаміка зміни обвугленої зони досліджуваного зразка із вогнезахисним облицюванням у два шари

Вивчення динаміки обвуглювання досліджуваних зразків дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього показує, що на початку впливу пожежі найбільший опір обвуглюванню має зразок із двошаровим вогнезахисним облицюванням, дещо менший опір має зразок із облицюванням в один шар, що помітно більший за опір фрагменту без вогнезахисного облицювання [76]. Зважаючи на фізичну суть процесу обвуглювання це очікуваний результат. На певному етапі швидкість поширення обвугленої зони досліджуваних зразка без облицювання стає набагато більшою за зразки інших двох типів. Це може бути пояснено тим, що запропоноване вогнезахисне облицювання має значну вогнезахисну ефективність у порівнянні із зразком без вогнезахисту. На це також вказують графіки критичної температури нагріву на рисунку 4.9. Це свідчить про перспективність запропонованого технічного рішення щодо системи вогнезахисту на основі плит OSB [76].

Аналіз рисунках. 4.10 – 4.12 [76] показує, що найбільшою вогнезахисною здатністю має володіти вогнезахисне облицювання у два шари оскільки при їх застосуванні зона обвуглювання є істотно меншою за інші досліджувані зразки, що також є очікуваним результатом. Відповідно менша зона обвуглювання розуміє більшу межу вогнестійкості для дерев'яних колон із запропонованою системою вогнезахисту.

4.5 Висновки за розділом

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки.

- У даному розділі розроблений метод інтерполяції температурних полів у перерізі досліджуваних зразків дерев'яних колон із вогнезахисним облицюванням та без нього, підданих вогневим випробуванням.
- Із застосуванням розробленого метода інтерполяції визначені розподіли температури у перерізі досліджуваних зразків дерев'яних колон із вогнезахисним облицюванням та без нього з врахуванням температурних вимірювань, що виконані під час проведення випробувань.

- З огляду на отримані закономірності швидкості обвуглювання деревини досліджуваних зразків колон із вогнезахисним облицюванням та без нього були визначені критичні температури обвуглювання для кожного моменту часу вогневого випробування.
- На основі отриманих залежностей були визначені зони обвуглювання досліджуваних зразків колон із вогнезахисним облицюванням та без нього, підданих випробуванням.

РОЗДІЛ 5 МЕТОДОЛОГІЯ, МЕТОД І МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕЖ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОЛОН З ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ

5.1. Метод визначення геометричних параметрів перерізів дерев'яних колон квадратного перерізу з вогнезахисним облицюванням з врахуванням обвугленої зони

Для визначення геометричних параметрів приведенного перерізу дерев'яних колон з врахуванням обвугленої зони пропонується метод з використанням величини «критичної температури обвуглювання», що визначалася у попередньому розділі (див. п. 4.5). Для цього мають бути проведені такі процедури:

1. Будується температурний розподіл по перерізу дерев'яної колони без врахування вогнезахисного облицювання з використанням рекомендацій п. В.1 та В.2 EN 1995-1-2 [58] із застосуванням методу кінцевих різниць, або кінцевих елементів.

2. За однією з координат вибираються сусідні вузли для 1/8 частини перерізу, що мають температуру більшу та меншу за величину «критичної температури обвуглювання» і визначаються середні значення відповідної координати для даних вузлів.

3. Середнє значення даних координат визначається як ширина приведенного квадратного перерізу із врахуванням зони обвуглювання.

Схема визначення ширини приведенного перерізу дерев'яної колони із квадратним перерізом із використанням величини «критичної температури обвуглювання» наведена на рисунку 5.1.

Для проведення розрахунку достатньо розглянути лише 1/8 частину перерізу колони, оскільки умова симетрії її перерізу повністю відтворює отримані результати для інших його частин.

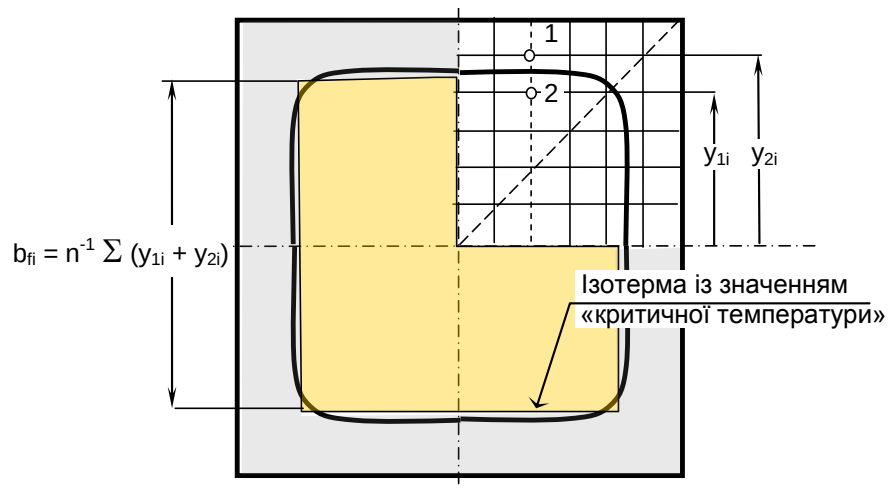


Рисунок 5.1 – Схема визначення ширини приведених перерізів дерев'яних колон із вогнезахисним облицюванням та без нього із використанням величини «критичної температури обвуглювання»

Критична ширина перерізу дозволяє визначити інші його геометричні параметри та використати їх для розрахунку несучої здатності дерев'яних колон із вогнезахисним облицюванням та без нього.

5.2. Метод розрахунку несучої здатності перерізів дерев'яних колон квадратного перерізу з вогнезахисним облицюванням з врахуванням обвугленої зони

Для несучої здатності дерев'яних колон за умов пожежі із стандартним температурним режимом з врахуванням обвугленої зони пропонується метод рекомендований EN 1995-1-1 та EN 1995-1-2 [58, 105, 106]. Даний метод полягає у визначенні граничних нормальних напружень за формулою:

$$f_{c,d\,fi} = k_{fi} f_{c,0,k} k_{c,fi}, \quad (5.1)$$

де $f_{c,0,k} = 21$ МПа – міцність деревини на розтяг (конструкційна сосна класу міцності С24);

$k_{fi} = 1,25$ – коефіцієнт збільшення міцності;

$k_{c,fi}$ – коефіцієнт гнучкості колони, що визначається за рис. 5.2.

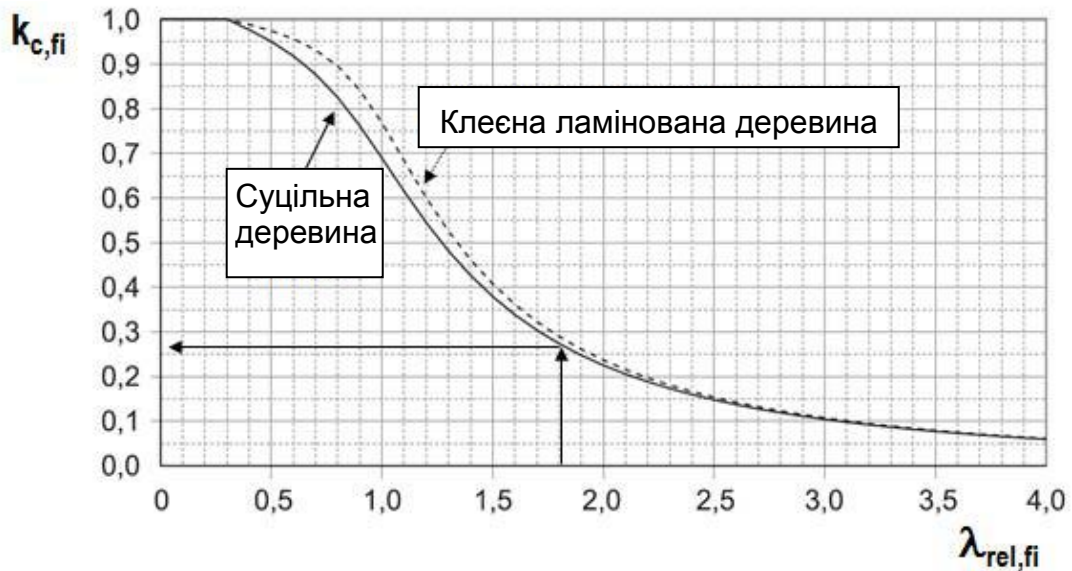


Рисунок 5.2 – Залежність коефіцієнта гнучкості колони від її відносної гнучкості під час пожежі

Відносна гнучкість колони визначається за формулою [58 , 105, 106]:

$$\lambda_{rel,fi} = \frac{\lambda_{fi}}{\pi} \sqrt{\frac{3f_{c,0,k}}{2E_{mean}}}, \quad (5.2)$$

де $E_{mean} = 1100$ МПа– середній модуль пружності деревини.

Гнучкість λ_{fi} під час пожежі визначається за формулою:

$$\lambda_{fi} = l/i_{fi}, \quad (5.3)$$

де l – приведена довжина колони;

i_{fi} – радіус інерції приведенного перерізу дерев'яної колони із вогнезахисним облицюванням та без нього на даному часі розвитку пожежі.

Радіус інерції для приведенного квадратного перерізу колони визначається за такою формулою:

$$i_{fi} = \frac{b_{fi}}{\sqrt{12}} \quad (5.4)$$

Для збереження колоною несучої здатності має виконуватися умова [58, 105, 106]:

$$f_{c,dfi} \geq \sigma_{dfi}, \quad (5.5)$$

де σ_{dfi} – напруження у перерізі колони від діючого навантаження, що визначається за виразом:

$$\sigma_{d,fi} = N_{fi} / A_{fi}. \quad (5.6)$$

Тут N_{fi} – діюче навантаження, що визначається із врахуванням коефіцієнту зменшення довготривалого та постійного навантаження під час пожежі за рекомендаціями [58, 105, 106];

$A_{fi} = b_{fi}^2$ – площа приведеного поперечного квадратного перерізу колони шириною b_{fi} із врахуванням обвугленої зони.

5.3. Обґрунтування методики створення таблиць для оцінки класу вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням

Табличний метод, що описаний у [106] щодо розрахунку залізобетонних і сталезалізобетонних елементів будівельних конструкцій на вогнестійкість не має розвитку у рекомендаціях, наведених у EN 1995-1-2 [58]. Враховуючи високу ефективність табличного методу для інженерної оцінки класів вогнестійкості будівельних конструкцій, як це було показано у роботі [106], можна припустити, що розробка таких таблиць для дерев'яних колон із вогнезахистом дозволить підвищити продуктивність та зменшити

складність та трудомісткість цих розрахунків. Для цього було запропоновано використання розрахункового методу на основі підходів, основні положення яких наведені у двох попередніх пунктах. Ефективність цього метода та достатня його точність підтверджена результатами вогневих випробувань, як це показано у роботі [106].

Створення таблиць для запропонованого інженерного методу оцінки класів вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням та без нього було запропоновано здійснювати за методикою, що розуміє виконання таких процедур:

1. Вибираються найбільш значущі параметри дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням, що впливають на їх вогнестійкість.

2. Будуються універсальні апроксимаційні моделі для розв'язку теплотехнічної та міцнісної задач для дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням із змінними параметрами, які є значущими щодо впливу на клас вогнестійкості.

3. Створюється математична модель на основі прийнятої регресійної залежності.

4. Складається план повного факторного обчислювального експерименту.

5. Проводиться повний факторний обчислювальний експеримент з використанням створених плану експерименту та апроксимаційних моделей із змінним параметрами.

6. Визначаються коефіцієнти регресійної залежності та будується математична модель залежності межі вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням від вибраних параметрів.

7. На основі побудованої математичної моделі складається відповідна таблиця типу стосовно мінімальних проектних параметрів дерев'яних колон

квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням для забезпечення потрібного класу вогнестійкості.

5.3.1. Побудування плану повного факторного експерименту

Для побудування плану повного факторного експерименту були проаналізовані незалежні і найбільш значущі параметри, що позначаються на вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням. При цьому встановлені три незалежних фактори – ширина перерізу колони без вогнезахисту, товщина шару вогнезахисного облицювання $w = d \cdot n$ (n – кількість шарів вогнезахисного облицювання, d – товщина одного шару), а також коефіцієнт діючого навантаження по відношенню до руйнуючого навантаження μ . У табл. 5.1 вказані інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів.

Таблиця 5.1 – Інтервали варіювання факторів у чисельному експерименті

Ширина перерізу колони, мм			Товщина шару вогнезахисного облицювання, мм			Коефіцієнт навантаження		
Найменше значення, b_{-1}	Середнє значення, b_0	Найбільше значення, b_1	Найменше значення, w_{-1}	Середнє значення, w_0	Найбільше значення, w_1	Найменше значення, μ_{-1}	Середнє значення, μ_0	Найбільше значення, μ_1
100	250	400	0	20	40	0,3	0,5	0,7

В якості критерію настання граничного стану розглядалися втрата несучої здатності. Аналіз графіків на рисунку 5.3 показує, що межа вогнестійкості наростає за законом, що є близьким до лінійної залежності. Це дозволяє припустити, що регресійна залежність межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності також буде лінійною.

Вибрані параметри є незалежними за їх природою.

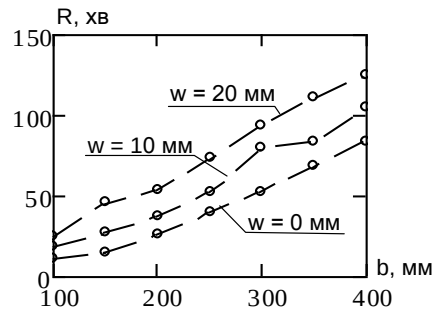


Рисунок 5.3 – Графіки залежностей межі вогнестійкості за несучою здатністю колон квадратного перерізу від його ширини без вогнезахисту ($w = 0$ мм), з вогнезахистом плитою OSB в 1 шар ($w = 10$ мм), з вогнезахистом плитою OSB в 2 шари ($w = 20$ мм)

Математична модель за зробленим нами припущенням відповідає лінійній залежності межі вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності та факторами, яка має такий вигляд [107, 108, 111]:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (5.7)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$ – коефіцієнти регресії.

Для визначення коефіцієнтів регресії відповідно до формули (5.7) необхідно провести 8 чисельних експериментів [107, 108] за складеною для цього матриці планування, що записана у вигляді таблиці 5.2 [111].

Таблиця 5.2 – Типова матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі

№ [111]	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Для проведення повного факторного експерименту були розроблені апроксимаційні моделі для вирішення теплової та міцнісної задач. Дані схеми мають вигляд такий самий як і схеми, що були розроблені у двох попередніх розділах. Геометричні параметри дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням та механічні характеристики деревини колон наведені у таблиці 5.3 [111].

Таблиця 5.3 – Основні параметри дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри • ширина перерізу • ширина захисного шару • довжина	b w l	(див. табл. 5.1) (див. табл. 5.1) 3,5	м
Матеріал	Деревина – сосна конструкційна	Клас міцності С24	
Густина деревини	ρ_B	530	кг/м ³
Теплофізичні характеристики		(див. табл. 3.10)	
Гранична вологість	u	< 3	%
Гранична міцність	$f_{c,0,k}$	21	МПа
Середній модуль пружності	E_{mean}	1100	МПа

Варіюючи параметри згідно із таблиці 5.1 та таблиці 5.2, і проводячи розрахунки за методикою п. 5.1 та п. 5.2 даної роботи (за розробленими апроксимаційними моделями, були отримані класи вогнестійкості досліджуваних дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням. Отримані дані наведені у таблиці 5.4 [111].

Таблиця 5.4 – Межі вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням, отримані в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування

Експериментальна ситуація	1	2	3	4	5	6	7	8
Межа вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням, y_i , хв	115	18	61	6	125	25	84	11

Використовуючи дані таблиці 5.4 мають бути визначені коефіцієнти регресійної залежності (5.7) за формулами [109, 110]:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i ; b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i ; b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i ; \\
 b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i ; b_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i ; \\
 b_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i ; b_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i ; b_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i ,
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

де $N = 8$ – кількість експериментальних ситуацій згідно із планом експерименту;

x_i – значення параметру згідно із матрицею плану (див. таблицю 5.2);

y_i – значення межі вогнестійкості вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням плити згідно із таблицею 5.4.

Використовуючи формули (5.8), були визначені коефіцієнти регресії, які наведені у таблиці 5.5 [111].

Таблиця 5.5 – Коефіцієнти регресії для вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням від їх конструктивних параметрів

Коефіцієнт	b_0 ,	b_1 ,	b_2 ,	b_3 ,	b_4 ,	b_5 ,	b_6 ,	b_7
Значення	55.625	40.625	15.125	-5.625	8.625	-2.625	1.375	1.875

5.3.2. Результати розрахунку за створеною математичною моделлю

Використовуючи отриману регресійну залежність [111], були побудовані відповідні поверхні залежності межі вогнестійкості від вибраних найбільш значущих параметрів дерев'яної колони при завданні різних значень діючого навантаження, які показані на рисунку 5.4. На побудованих поверхнях показані рівні, що відповідають різним значенням межі вогнестійкості.

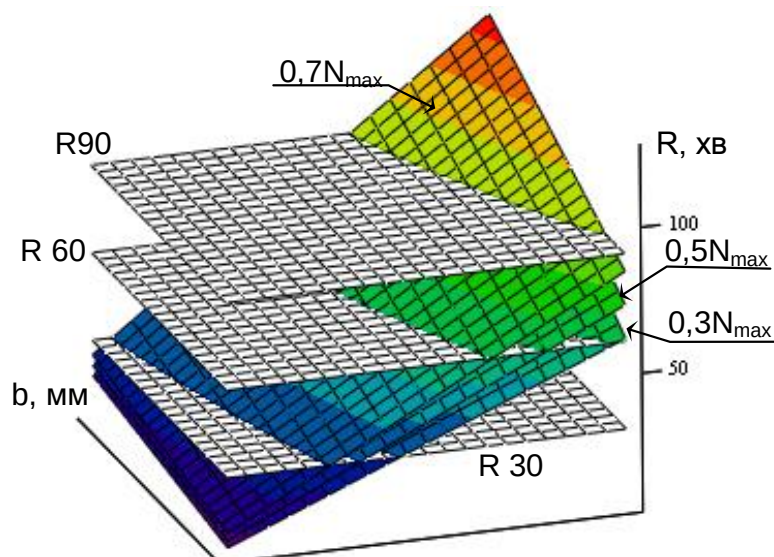


Рисунок 5.4 – Поверхні залежності межі вогнестійкості від найбільш значущих параметрів дерев'яної колони із вогнезахисним облицюванням для різних значень діючого навантаження

Для аналізу впливу найбільш значущих параметрів дерев'яної колони із вогнезахисним облицюванням параметрів на межу вогнестійкості були

побудовані взаємні залежності даних геометричних параметрів в умовах дії навантажень із різним рівнем. На рисунку 5.5 наведені побудовані відповідні графіки.

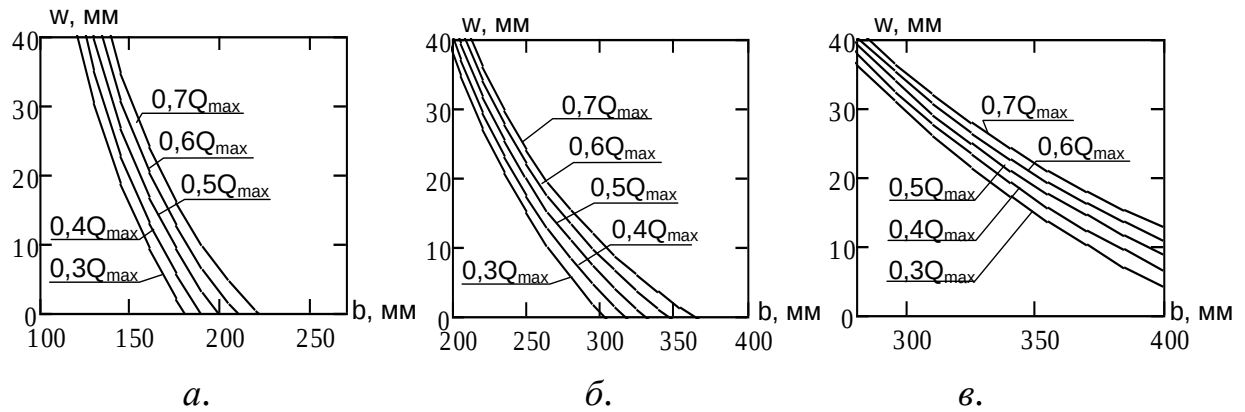


Рисунок 5.5 – Залежності захисного шару вогнезахисного облицювання від висоти ширини дерев'яної вогнезахищеної колони для забезпечення межі вогнестійкості: *a* – R 30; *б* - R 60; *в* - R 90

Отримані дані дозволяють провести визначення мінімальних розмірів вогнезахисного облицювання дерев'яних колон для забезпечення необхідної вогнестійкості.

5.3.3. Перевірка адекватності результатів

Використовуючи дані щодо розрахунку для дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням, були визначені їх межі вогнестійкості при різних значеннях значущих параметрів за настанням граничного стану втрати несучої здатності. В якості критеріїв адекватності результатів, визначених за регресійною моделлю, були розглянуті абсолютне та відносне відхилення [112 – 114].

Таблиця 5.6 – Адекватність результатів, визначених за регресійною залежністю для дерев'яної колони 300×300 квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням у 2 шари

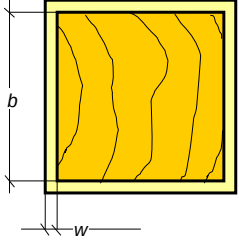
Межа вогнестійкості за розрахунком, хв	Межа вогнестійкості за регресійною залежністю, хв	Абсолютне відхилення, хв	Відносне відхилення, %
Рівень навантаження $0,3Q_{max}$			
96	82	14	14,6
Рівень навантаження $0,5Q_{max}$			
77	72	5	5,2
Рівень навантаження $0,7Q_{max}$			
68	62	6	8,8
Середнє значення			
-	-	8,3	9,5

Дані таблиці 5.6 показують, що похибка результатів, отриманих за регресійною моделлю є незначною і дана регресійна залежність може бути використана для обґрунтування конструктивних параметрів дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням для забезпечення необхідного класу їх вогнестійкості.

5.4. Обґрунтування удосконаленого табличного методу для оцінки класу вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням

Використовуючи побудовані регресійні залежності було використано для створення таблиці мінімальних розмірів дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням для забезпечення необхідної вогнестійкості. Для цього були визначені мінімальні розміри, що наведені у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Розміри дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням для забезпечення заданого класу вогнестійкості

		Умови застосування Колона ширина $b \geq 100$ мм Вогнезахисне облицювання плита OSB товщина з.ш. $0 \leq w \leq 40$ мм		Класи вогнестійкості			
				R 30	R 60	R 90	R 120
1	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,3$ ширина/товщина захисного шару (мм)	100/40 200/0 300/0 400/0	200/20 300/0 400/0	300/30 400/4	300/40 400/25		
2	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,5$ ширина/товщина захисного шару (мм)	200/0 300/0 400/0	200/35 300/8 400/0	300/34 400/9	400/28		
3	Мінімальні розміри перерізу для рівня навантаження $\eta_{fi,t} \leq 0,7$ ширина/товщина захисного шару (мм) (мм)	200/4 300/0 400/0	200/40 300/12 400/0	300/38 400/13	400/30		

Отримання даних, які наведені у таблиці 5.7, можна прийти до висновку, що розроблений удосконалений табличний метод, що дозволяє ефективно визначити проектні дані вогнезахисного облицювання дерев'яних колон квадратного перерізу для забезпечення необхідного класу вогнестійкості. Дані таблиці 5.7 визначені з врахуванням похибки 9,5 % при збільшенні мінімальних розмірів. Таким чином табличні дозволяють спроектувати вогнезахисне облицювання дерев'яних колон квадратного перерізу з гарантованим класом вогнестійкості, що вказаний у таблиці 5.7. Це дозволяє доповнити другу частину Eurocode 5 додатковими даними для проектування вогнезахисного облицювання дерев'яних колон квадратного перерізу з із гарантованою вогнестійкістю.

5.5 Висноки за розділом

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

- проведений повний факторний експеримент з використанням спрощеного методу, рекомендованого облицювання з використанням рекомендацій п. В.1 та В.2 EN 1995-1-2, на основі чого встановлені закономірності і побудована математична модель зміни межі вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі плит OSB згідно із стандартним рядом розмірів їх ширини, товщини облицювання та рівня навантаження;
- доведено, що побудована математична модель дозволяє отримувати адекватні результати, оскільки їх середня похибка складає 9,5 %;
- обґрунтований розрахунковий табличний метод оцінки класу вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі плит OSB на основі побудованої математичної моделі;
- показано, що удосконалений табличний метод оцінки класу вогнестійкості дерев'яних колон квадратного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі плит OSB є ефективним, оскільки має більш низьку трудомісткість ніж інші розрахункові методи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуального наукового завдання розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів, а також навантаження дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на межі їх вогнестійкості як наукове підґрунтя методології прогнозування їх значень. При цьому:

1. За результатами проведеного аналізу статистики пожеж і літературних джерел щодо сучасного стану забезпечення вогнестійкості дерев'яних колон та методів їх оцінювання встановлено, що у 33,3 % випадках пожеж дерев'яні

колони споруд втрачали свою несучу здатність, що призводило до руйнування будівель з їх застосуванням. Використання вогнезахисного облицювання дерев'яних колон деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) є одним із шляхів забезпечення нормованих значень класів їх вогнестійкості, але поширення обсягів використання таких будівельних конструкцій стримується відсутністю методології та методики прогнозування їх вогнестійкості.

2. Розроблено методику і проведено експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі за стандартним температурним режимом з метою отримання температурних показників та геометричних параметрів зони обвуглювання за різні проміжки часу. Виявлено залежності швидкості обвуглювання дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) в один, два шари та без нього, що описуються формулою $v(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$ та визначені коефіцієнти даної регресії для таких колон.

3. Здійснено перевірку адекватності отримання температурних розподілень в перерізі досліджуваних зразків підданих вогневій дії при проведенні експериментальних досліджень, шляхом математичного моделювання. Встановлено, що різниця між значеннями температур у зразку із реальними конструктивними особливостями та значеннями температур у зразках без таких особливостей відрізняються не більше за 30 °C при максимальному відхиленні. При цьому відносна похибка складає всього 4,5 %, а критерій Фішера не перевищує табличного значення.

4. Розроблено методику інтерполяції температурних розподілень в перерізі досліджуваних зразків дерев'яних колон та визначено з її застосуванням відповідні температурні поля. Здійснено порівняння отриманих температурних розподілів у результаті апроксимації температур за експериментальними даними та отриманих на основі вирішення теплотехнічної задачі, встановлено що вони є

схожими, а відносна похибка складає не більше 15 %. Це підтверджує адекватність досліджень.

5. Розроблено методику математичного описання зони обвуглювання, що дало можливість знайти величини критичної температури обвуглювання та приведенного поперечний перерізу дерев'яної колони, необхідного для проведення міцнісного розрахунку.

6. Розроблено розрахункову методику та з її застосуванням виявлено залежності межі вогнестійкості дерев'яної колони з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) (y) від розмірів перерізу (x_1), товщини захисного шару (x_2) та прикладеного навантаження (x_3), що виражається формулою $y = 55,625 + 40,625x_1 + 15,125x_2 - 5,625x_3 + 8,625x_1x_2 - 2,625x_1x_3 + 1,375x_2x_3 + 1,875x_1x_2x_3$;

7. Обґрунтовано та запропоновано розрахунковий табличний метод для оцінювання вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням деревинностружковими плитами з орієнтованою стружкою (OSB) шляхом створення довідникової таблиці з вимогами щодо необхідних геометричних параметрів, товщини облицювання, розмірів перерізу колони та механічного навантаження, що здатний спростити проведення розрахунків та може доповнити існуючу нормативну базу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кодекс цивільного захисту України: за станом на 02 жовтня 2012 р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К.: Парлам. вид-во, 2012. – 124 с.
2. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2013 р./ МНС України – К.:ВДіСП, [Електронний ресурс] : УкрНДІЦЗ. – 2013. - С. 13. – Режим доступу до сайту.: http://undicz.dsns.gov.ua/files//2013/AD_12_13.pdf.
3. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2014 р./ МНС України – К.:ВДіСП, [Електронний ресурс] : УкрНДІЦЗ. – 2014. - С. 54. – Режим доступу до сайту.: http://undicz.dsns.gov.ua/files//2014/AD_12_14.pdf.
4. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2015 р./ МНС України – К.:ВДіСП, [Електронний ресурс] : УкрНДІЦЗ. – 2015. - С. 24. – Режим доступу до сайту.: http://undicz.dsns.gov.ua/files//2015/AD_12_15.pdf.
5. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2016 р./ МНС України – К.:ВДіСП, [Електронний ресурс] : УкрНДІЦЗ. – 2016. - С. 37. – Режим доступу до сайту.: http://undicz.dsns.gov.ua/files//2016/AD_12_16.pdf.
6. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2017 р./ МНС України – К.:ВДіСП, [Електронний ресурс] : УкрНДІЦЗ. – 2017. - С. 32. – Режим доступу до сайту.: http://undicz.dsns.gov.ua/files//2017/AD_12_16.pdf.
7. Фещук Ю.Л. Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним лицюванням / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис // Пожежна безпека: збірник наукових праць ЛДУБЖД. – Львів, 2017 – № 30. – С. 159 – 167.
8. Ройтман В.М., Серков Б.Б., Шевкуненко Ю.Г., Сивенков А.Б., Барінова Е.Л., Приступюк Д.Н. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре / Учебник под общей редакцией В.М. Ройтмана. – 2-е изд. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – 366 с.
9. Б.Г. Демчина. Поведінка дощатоклеєних колон за місцевого впливу температури / А.Б. Пелех, Г.М. Олексин, М.І. Сурмай // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2009. - № 655. - С. 71-74. - Бібліогр.: 3 назв. - укр.

10. А.Б. Пелех . 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 // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - № 627. - С. 167-171. - Бібліогр.: 4 назв. - укр.

11. Summary of the fire protection foundation report - fire safety challenges of tall wood buildings [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://firesciencereviews.springeropen.com/articles/10.1186/s40038-015-0009-3>.

12. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2016. – [Чинний від 2017-06-01]. – К.: Держбуд України, 2017. – 39 с. – (Державні будівельні норми України).

13. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека (ISO 831: 1975) ДСТУ Б В. 1.1-4-98*. [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с. – (Національний стандарт України).

14. Змага Я.В. Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека»/ Я.В. Змага. – Харків 2016.

15. Демешок В.В. Розрахунковий метод оцінки вогнестійкості дерев'яної плити перекриття за допомогою методу кінцевих елементів / В. В. Демешок // Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. – 2016. – № 2. – С. 67 – 74.

16. Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.

17. Будинки і споруди. Жилі будинки. Основні положення. ДБН В.2.2-15-2005. [Чинні від 01.01.2006] Держбуд України від 18.05.2005 № 80 – 45 с. – (Державні будівельні норми України).

18. Будинки і споруди. Підприємства торгівлі. ДБН В. 2.2-23:2009 [Чинні від 01.07.2009] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 16.01.2009 №4 – 59 с. – (Державні будівельні норми України).

19. Будинки і споруди. Культурно-видовищні та дозвіллієві заклади. ДБН В 2.2-16-2005. [Чинний від 01-04-2006] Держбуд України від 27.09.05 № 171 – 20 с. – (Державні будівельні норми України).

20. Будинки і споруди. Дошкільні навчальні заклади. ДБН В.2.2-4-97. [Чинний від 27-06-1996] Держкоммістобудування України від 06.08.1997 № 136 – 48 с. – (Державні будівельні норми України).

21. Будинки і споруди. Будинки та споруди навчальних закладів. ДБН В.2.2-3-97. Основні положення. – [Чинний від 27-06-1996] Держкоммістобудування України від 6.08.97 р. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).

22. Будинки і споруди. Заклади охорони здоров'я. ДБН В.2.2-10-2001. Основні положення. – [Чинний від 04-01-2001]. Держбуд України від 01.04.2001 № 2. – 45 с. – (Державні будівельні норми України).

23. Будинки та споруди. Підприємства харчування. ДБН В.2.2-25-2009. Основні положення. – [Чинний від 01-09-2010]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва від 30.12.2009 № 703. – 85 с. – (Державні будівельні норми України).

24. Будинки та споруди. Спортивні та фізкультурно-оздоровчі споруди. ДБН В.2.2-13-2003. Основні положення. – [Чинний від 01-03-2004]. Держбуд України від 10.11.2003 № 184. – 105 с. – (Державні будівельні норми України).

25. Будинки та споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. ДБН В.2.2-28-2010. Основні положення. – [Чинний від 01-10-2011]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва від 30.12.2010 № 570. – 28 с. – (Державні будівельні норми України).

26. Наказ МНС України від 02.07.2007 № 460 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0849-07>.

27. Древесина огнезащищенная. Общие технические требования. Методы испытаний. Транспортирование и хранение: ГОСТ 30219-95 (Межгосударственный стандарт). – 45 с.
28. Жартовський В.М. Дослідження з підвищення ефективності застосування вогнезахищеної деревини / В.М. Жартовський, Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко, Р.В. Ліхньовський // Науковий вісник УкрНДПБ. –2006. – № 1 (13). – С. 55 – 58.
29. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения: ГОСТ 2140-81.
30. Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов/ В.И. Горшков. – М.: ВНИИПО. – 2003. – С. 446.
31. Собурь С.В. Огнезащита строительных материалов и конструкций: Справочник / С.В. Собурь. – М.: Спецтехника, 2000. – 112 с.
32. Максименко Н.А. Новые огнезащитные и огнебиозащитные препараты для пропитки древесины / Н.А. Максименко // Эффективное использование древесины и древесных материалов в строительстве: Всесоюз. совещ., 18-20 июня 1980 г., Архангельськ: тез. докл. – М., 1980. – С. 384-386.
33. Огнезащита деревянных конструкций [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://firesafetyblog.ru/ognezashhita/ognezashhita-derevyannykh-konstrukcij.html>.
34. Огнезащита: преимущества и недостатки [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.polifan-lkm.ru/articles/st-ognezashity-sposoby>.
35. Jones B. Modeling the Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires and Standart Furnace Tests / B. Jones, H. Gerlich, A. Buchanan // Proceedings of the 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (Melbourne, Australia, 2002).
36. Lu W. Advanced Steel Structures. Structural Fire Design / W. Lu, P. Makelainen // Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 29. – Espoo, 2003.

37. Волосухин В.А. Строительные конструкции / Волосухин В.А., Евтушенко С.И., Меркулова Т.Н. – М.: Феникс, 2013. – 554 с.
38. Пушкаренко А.С. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур: Навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / А.С. Пушкаренко, О.В. Васильченко. – Харків: АПБУ. – 2001. – 166 с.
39. Цапко Ю.В. Оцінювання експлуатаційної надійності вогнезахищеної деревини. / Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко // Пожежна та техногенна безпека України: Міжнар. наук.-практ. конф., Київ: тез.доп. – К.: УкрНДІПБ. – 2005. – С. 51.
40. Кисилев Я.С. Физические модели горения в системе предупреждения пожаров / Я.С. Кисилев. – СПб.: Санкт-Петербургский университет МВД России. – 2000. – 263 с.
41. Соколенко К.І. Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів із застосуванням вогнезахищеної деревини: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / К.І. Соколенко. – Київ, 2005. – 22 с.
42. Тычино Н.А. Эксплуатационная надежность огнезащищенных древесных материалов. / Н.А. Тычино // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. – 2002. – Вып. 2. – С. 27 – 30.
43. Зенков Н.И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара: Учебник [для слушателей вузов по специальности «Инженер противопожарной техники и безопасности»] / Н.И. Зенков. – М.: Высш. инж. пожар.-техн. школа МВД СССР. – 1974. – 176 с.
44. Страхов В.Л. Огнезащита строительных конструкций / В.Л. Страхов, А.М. Крутов, Н.Ф. Давыдкин. – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР». – 2000. – 433 с.
45. Романенков И.Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / И.Г. Романенков, В.Н. Зигерн-Корн. – М.: Стройиздат. – 1984. – 240 с.

46. Науменко З. М. Применение клееной фанеры в строительстве / З.М. Науменко // Фанера и плиты. – 1970. – С. 20.
47. Древесина слоистая клеенная. Методы определения предела прочности при скалывании: ГОСТ 9625-87.-1995. М.: Издательство стандартов, 1995.
48. Древесина слоистая клеенная. Методы определения предела прочности и модуля упругости при статистическом изгибе: ГОСТ 9625-87.-1989. М.: Издательство стандартов, 1989.
49. Плиты древесно-стружечные и фанера. Перфораторный метод определения содержания формальдегида: ГОСТ 27678-88.-1990. М.: Издательство стандартов, 1990.
50. Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-3:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-13:2007 [Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007 № 64 – 6 с. – (Національний стандарт України).
51. Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-4:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-14:2007 [Чинні від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від 22.06.2007 № 63 – 6 с. – (Національний стандарт України).
52. Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-20:2008.
53. Новак С.В., Нефедченко Л.М., Абрамов О.О. Методи випробувань будівельних конструкцій та виробів на вогнестійкість. – Київ: Пожінформтехніка, 2010. – 132 с.
54. Матеріали будівельні. Методи випробовувань на горючість: ДСТУ Б В.2.7.-19-95 (ГОСТ 30244-94).
55. Матеріали будівельні. Метод випробовування на займистість: ДСТУ Б В.1.1-2-97(ГОСТ 30402-96). – 28 с.
56. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.

57. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010, [Чинний від 01.07.2013] Мінрегіонбуду України від 27.12.2010 р. № 549 – 74 с. (Національний стандарт України).

58. Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012 [Чинний від 01.07.2013] Мінрегіонбуду України від 21.12.2012 р. № 652 – 90 с – (Національний стандарт України).

59. Некора О.В. Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних будівельних конструкцій: дис. кандидата техн. наук : 21.06.02 / Некора Ольга Валеріївна. – Черкаси, 2008. – 147 с.

60. British Standards Institution, BS EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire, London, November 2002.

61. Шналь Т.М. Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: Навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / Т.М. Шналь – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2006. – 220 с.

62. Фещук Ю.Л. Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис, Ю.В. Долішній // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ. – 2017 – № 1 (3)., С. 98 – 103.

63. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В.М. Ройтман. – М.: Пожарная безопасность и наука, 2001. – 382 с.

64. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad: Учебный курс / Макаров Е.Г. – СПб.: Питер. – 2003. – 448 с.

65. Дьяконов В. П. Mathcad 8/2000: специальный справочник / Дьяконов В. П. – СПб: Изд-во «Питер», 2000. – 592 с.
66. Шналь Т.М. Аналіз методів проведення натурних випробувань на вогнестійкість будівель та споруд / Т. М. Шналь, І. П. Синенько, Д. А. Ясінський // Вісник НУ “Львівська політехніка”: зб. наук. пр. – Львів: НУ “Львівська політехніка” 2010. – № 664. – С. 357–362. – (Серія : Теорія і практика будівництва).
67. Демчина Б.Г. Сучасні тенденції у дослідженнях вогнестійкості будівельних конструкцій // Пожежна безпека : збірник наукових праць. – Львів, 2001. – С 383-385.
68. Пушкаренко А. С. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур / А. С. Пушкаренко, О. В. Васильченко. – Харків: АПБУ, 2001. – 166 с.
69. Романенко П. Н. Теплопередача в пожарном деле / Романенко П. Н., Бубырь Н. Ф., Башкирцев М. П. – М. : Научно-исследовательский и редакционно-издательский отдел, 1969. – 425 с.
70. Основы пожарной теплофизики / Башкирцев М. П. [и др.]. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Стройиздат, 1984. – 200 с. : ил.
71. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
72. Плити деревинностружкові з орієнтованою стружкою (OSB). Терміни та визначення понять, класифікація та технічні вимоги (EN 300:2006, IDT) ДСТУ EN 300:2008 [Чинний від 01.01.2010] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від № 289 15.08.2008 № 289 – 16 с. – (Національний стандарт України).
73. Плити деревностружкові. Технічні умови. Частина 4. Вимоги до плит, застосовуваних для тримальних конструкцій, розрахованих на сухі умови експлуатації (EN 312-4:1996) ДСТУ EN 312-4:2003 [Чинний від 01.07.2005] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від № 166 02.10.2005 № 166 – 10 с. – (Національний стандарт України).

74. Плити деревностружкові. Технічні умови. Частина 5. Вимоги до плит, застосовуваних у тримальних конструкціях, розрахованих на вологі умови експлуатації (EN 312-5:1997) ДСТУ EN 312-5:2003 [Чинний від 01.07.2005] Мінрегіонрозвитку та будівництва України від № 166 02.10.2005 № 166 – 12 с. – (Національний стандарт України).

75. Фещук Ю.Л. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности. – Харків. – 2017. – № 42., С. 155 – 164.

76. Фещук Ю.Л. Геометрія зони обуглення дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2018. – Вип. 1 (5). – С. 4 – 12.

77. Model Code on Fire Engineering. – ed. – ECCS, 2011.

78. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / Тихонов А.Н., Самарский А.А. – М.: Высшая школа, 1976. – 664 с.

79. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1971. – 554 с.

80. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / Самарский А.А., Вабищевич П.Н. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

81. Власова Е.А. Приближенные методы математической физики : [учебн. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко] / Власова Е.А., Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – 700 с.

82. Метод конечных элементов в механике твердых тел / [Сахаров А.С., Кислоокый В.М., Киричевский В.В. и др.] ; под ред. А.С. Сахарова, И.А. Альтенбаха. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.

83. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.

84. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4-х т. – Т.1. Кн.1. – М.: Наука, 1978. – 496 с.

85. Korhonen E.S. Natural fire modeling of large spaces / Helsinki University of Technology.

86. Баранов В.М. Термодинамика и теплопередача: учебное пособие: 2-е издание, переработанное / В.М. Баранов, А.Ю. Коньяков. – Хабаровск: Издательство ДВГУПС. – 2004. – 91 с.:ил.

87. Цой П. В. Методы расчета задач тепломассопереноса / Цой П.В. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – С.43-58.

88. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / Перельмутер А.В., Сливкер В.И. – К.: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.

89. Авчухов В. В. Задачник по процессам тепломассообмена [Текст] : учеб.пособие / В. В. Авчухов, Б. Я. Паюсте. – М. : Энергоатомиздат, 1986. –144 с.

90. Ефремов О.Ю. Военная педагогика: Учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Питер, 2017. – 640 с.: ил.

91. Поздєєв С.В. Визначення температурних полів у перерізі залізобетонної колони при її випробуванні на вогнестійкість / С.В. Поздєєв, В.К. Словінський, С.Д. Щіпець, А.М. Омельченко // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2013. – № 15. – С. 130 – 137.

92. Словінський В.К. Обґрунтування методу розв'язку міцнісної задачі при розрахунковій інтерпретації результатів вогневих випробувань залізобетонних колон // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. –К.: УкрНДІПБ, 2013. – № 2 (32). – С.5 – 11.

93. Горбаченко Я. В. Вогнестійкість дерев'яних балок з вогнезахистом/ Горбаченко Я. В., Поздєєв С. В., Некора О. В., Тищенко О. М., Гвоздь В. М.// Пожежна безпека: теорія і практика: збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля, – № 15. – с.63-68. (Серія КВ № 17574-6424 ПР).

94. Горбаченко Я.В. Геометрія зони обвуглювання у перерізах вогнезахищених дерев'яних балок в умовах пожежі// Поздєєв С. В., Некора

О. В., Горбаченко Я. В., Федченко І. В.//Проблеми пожежної безпеки. – Харків: НУЦЗУ, 2015. – Випуск 37. – с. 168-177 (Серія КВ 16673-5245 ПР).

95. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / Перельмутер А.В., Сливкер В.И. – К.: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.

96. Konig J.A design model for load-carrying timber frame members in walls and floors exposed to fire/Proceedings of CIB W18. Meeting 33. Paper 33-16-1, 2000.

97. Leong Poon J.P. Literature review on the contribution of fire resistant timber constructions to heat release rate / Warrington fire research. WFRA Project No.20633. Version 2b. – 77 p.

98. Bednarek Z., Kaliszuk-Wietecka A.: Scientific research on the influence of fireproof wood preservation carried out by the vacuum-pressure method on strength of wood in normal and elevated temperatures. Proceedings of the 8th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius 2004, 19-21 May, p. 963–967.

99. Silkok G.W.L. and Shields T.G. Relating Char to Fire Severity Conditions/ Fire and Materials, 25, 9 - 11, 2001.

100. Gerhards Ch. C.: Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. Wood and Fiber 2007, 14(1): 4–36.

101. Krakovsky A., Kral S. The influence of thermo mechanical loading on behavior of spruce wood. Technical University in Zvolen. – 2008 (Polish).

102. Glos P., Henrici D.: Stability of wood in high temperatures. Wood and Raw Materials 2007, p. 417–422.

103. American Wood Council, National Design Specification For Wood Construction, American Forest & Paper Association, Washington, DC, 2008.

104. Бутиков Е.И. Физика. Том 1 / Е.И. Бутиков, С.И. Кондратьев. – М.: Физматлит, 2008. – 352.

105. Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT) ДСТУ-Н Б EN

1995-1-1:2010 [Чинний від 01.01.2014] Мінрегіонбуду України від 27.12.2010 р. № 549 – 244 с – (Національний стандарт України).

106. O. Vassart, B. Zhao, L.-G. Cajot, F. Robert, U. Meyer, A. Frangi. Eurocodes: background & applications. Structural Fire Design. Worked examples. Luxemburg: Publication Office of the European Union. – 2014. – 252 p.

107. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М.: Мир. – 1975. – 648 с.

108. Шведов А.С. Теория вероятности и математическая статистика / А.С. Шведов. – М.: Издательский дом ГУ ВШЭ. – 2005. – 63.

109. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Хикс Ч. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 203 с.

110. Сидняев Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента : учеб. пособие / М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 463 с.

111. Фещук Ю.Л. Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник // Международный научный журнал "Интернаука". – 2018. – № 14. – с. 74 – 81. DOI 10.25313/2520-2057-2018-14-4089.

112. Нуянзін О.М. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / О.М. Нуянзін, С.В. Поздеев, В.М. Андрієнко // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2013. – № 13. – С. 91–100.

113. Очков В.Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров / Очков В.Ф. – М.: Компьютер Press, 1988. – 128 с.

114. Поршнев С.В. Численные методы на базе Mathcad / Поршнев С.В., Беленкова И.В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 464 с.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію
результатів дисертації

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Фещук Ю.Л. Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис // Пожежна безпека: збірник наукових праць ЛДУБЖД. – Львів, 2017 – № 30. – С. 159 – 167.

2. Фещук Ю.Л. Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис, Ю.В. Долішній // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2017 – №1 (3). – С. 98 – 103.

3. Фещук Ю.Л. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Проблемы пожарной безопасности: сборник научных трудов. – Харків, 2017 – Вип. 42. – С. 155 – 164.

4. Фещук Ю.Л. Геометрія зони обвуглення дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі // Ю.Л. Фещук // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2018 – № 1 (5). – С. 4 – 12.

5. Фещук Ю.Л. Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник // Международный научный журнал "Интернаука". – 2018. – Вып. 14. – С. 74 – 81. DOI 10.25313/2520-2057-2018-14-4089.

Апробація матеріалів дисертації:

1. Фещук Ю.Л. Актуальність використання розрахункових методів для оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій / Ю.Л. Фещук // Матеріали 18 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України: перспективи та шляхи до європейського простору». – Київ. – 2016. – С. 305 – 306.

2. Фещук Ю.Л. Актуальність дослідження вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахистом / Ю.Л. Фещук // Матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної

конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». – Київ. – 2017. – С. 446 – 448.

3. Фещук Ю.Л. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2017. – С. 51 – 54.

4. Фещук Ю.Л. Залежність глибини обуглювання дерев'яних колон з вогнезахистом та без нього від часу вогневого впливу / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис. // Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Пожежна безпека: проблеми та перспективи». – Харків. – 2018. – С. 75 – 77.

5. Фещук Ю.Л. Зміна температури в шарах дерев'яної колони з вогнезахисним облицюванням та без нього від часу вогневого впливу / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв // Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності». – Львів. – 2018. – С. 75 – 77.

6. Фещук Ю.Л. Скорость обугливания деревянных колонн с огнезащитной облицовкой и без нее / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев // Сборник материалов XII международной научно-практической конференции молодых ученых «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы». – Минск. – 2018. – С. 91 – 92.

7. Фещук Ю.Л. Адекватність вимірювання у фрагментах дерев'яних колон під час вогневих випробувань / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Технології та інфраструктура транспорту». – Харків. – 2018. – С. 311 – 313.

Додаток Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «Пожтест»

 І.Р. Василенко


«31» листопада 2018 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Фещука Юрія Леонідовича за темою:
**«Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним
облицюванням»**

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Фещука Ю.Л. за темою «Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням» впроваджено у роботу ТОВ «Пожтест» шляхом застосування запропонованого алгоритму визначення межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням за допомогою створеної таблиці мінімальних розмірів у якості альтернативного засобу.

Результати дисертаційної роботи Фещука Ю.Л. також будуть використовуватись під час комплексної оцінки вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням експериментальним та розрахунковим методом.

Начальник випробувальної
лабораторії ТОВ «Пожтест»



І.С. Гаврилов

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. начальника Черкаського
інституту пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля
Національного університету
цивільного захисту України
кандидат технічних наук
професор



О.М. Тищенко

«02» серпня 2018 р.**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи
Фещука Юрія Леонідовича за темою:
**«Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним
облицюванням»**

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Фещука Ю.Л. за темою «Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням» впроваджено у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України на кафедрі безпеки об'єктів будівництва та охорони праці під час викладання навчальних дисциплін «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій» та «Стійкість будівель та споруд при пожежі».

Результати дисертаційної роботи використовуються на практичних заняттях та лабораторних роботах під час викладення вищезазначеної дисципліни для розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням з використанням розробленого табличного методу оцінювання таких конструкцій. Це дало змогу зменшити трудомісткість проведення розрахунків та дозволило забезпечити можливість вивчення курсантами та студентами сучасних підходів щодо оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

Начальник кафедри
безпеки об'єктів будівництва та охорони праці
Черкаського інституту пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля Національного університету
цивільного захисту України
к.т.н., доцент

«02» серпня 2018 р.

А.І. Березовський

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Начальник Українського
 науково-дослідного інституту
 цивільного захисту
 генерал-майор
 служби цивільного захисту
 кандидат технічних наук



В.С. Кропивницький

«серпень» 2018 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Фещука Юрія Леонідовича за темою:

«Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням»

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Фещука Ю.Л. за темою «Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням» впроваджено в роботу науково-дослідного центру технічного регулювання УкрНДІЦЗ.

Розроблений в роботі розрахунковий табличний метод, застосовується під час проведення розрахункової оцінки межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням.

Заступник начальника УкрНДІЦЗ

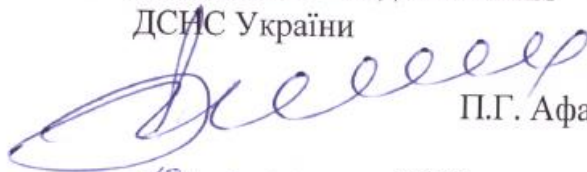
(з протипожежного захисту та
 техногенної безпеки)

полковник служби цивільного захисту
 кандидат технічних наук

«08» серпень 2018 р.

О.П. Борис

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора Департаменту
запобігання надзвичайним ситуаціям
ДСНС України


П.Г. Афанасьєв

«10» серпня 2018 р.**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи

Фещука Юрія Леонідовича за темою:

**«Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним
облицюванням»**

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Фещука Ю.Л. за темою «Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням» впроваджено в практику при оцінці вогнестійкості будівельних конструкцій.

Розроблений в роботі розрахунковий табличний метод з оцінки межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням доповнить нормативну базу з оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій при наступному її перегляді.

Начальник відділу технічного
регулювання та нормативної роботи
управління пожежної безпеки
Департаменту запобігання надзвичайним
ситуаціям ДСНС України
полковник служби цивільного захисту
«10» серпня 2018 р.



Р.В. Пальчиков