

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ІНСТИТУТ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ  
ІМЕНІ ГЕРОЇВ ЧОРНОБИЛЯ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

**На правах рукопису**

**ЗМАГА ЯНА ВАСИЛІВНА**

**УДК 614.84**

**РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ПІДВИЩЕНОЇ ТОЧНОСТІ ДЛЯ ОЦІНКИ  
МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК З ВОГНЕГАСНИМ  
ПРОСОЧЕННЯМ**

**Спеціальність 21.06.02 - пожежна безпека**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**

**Науковий керівник:**

**Поздєєв Сергій Валерійович**

**доктор технічних наук, професор**

**Черкаси - 2016**

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>4</b>
<b>РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК .....</b>	<b>10</b>
1.1. НОРМУВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ...	10
1.2. МЕТОДИ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ОБРОБКИ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ .....	14
1.2.1. Вогнезахисні речовини .....	14
1.2.2. Технології просочування .....	15
1.3. ПОВЕДІНКА ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ.....	17
1.4. МЕТОДИ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК .....	19
1.4.1. Експериментальні методи .....	19
1.4.2. Розрахункові методи .....	20
1.4.3. Експериментально – розрахункові методи. ....	27
1.5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ.....	28
1.6. ВИСНОВКИ.....	28
<b>РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>	<b>30</b>
2.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ .....	30
2.1.1. Обладнання та матеріали для виготовлення зразків-фрагментів.....	31
2.1.2. Обладнання для проведення вогневих випробувань .....	31
2.1.3. Устаткування для дослідження структури зразків .....	34
2.2. МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ЗРАЗКІВ – ФРАГМЕНТІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК .....	34
2.3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ ЗРАЗКІВ-ФРАГМЕНТІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК З ВОГНЕЗАХИСНИМ ПРОСОЧЕННЯМ І БЕЗ НЬОГО .....	39
2.4. МЕТОДИКА РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ НАГРІВУ ЗРАЗКІВ .....	40
2.5. ВИСНОВКИ.....	42
<b>РОЗДІЛ 3 ... РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ .....</b>	<b>44</b>
3.1. РЕЗУЛЬТАТИ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ ФРАГМЕНТІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК З ВОГНЕЗАХИСТОМ.....	44
3.2. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ОБВУГЛЮВАННЯ ФРАГМЕНТІВ БАЛОК.....	50
3.3. ОЦІНКА ТОВЩИНИ ШАРУ ОБВУГЛЮВАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРОВЕДЕНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ .....	52
3.4. ВИСНОВКИ.....	59
<b>РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПЕРЕРІЗІ ФРАГМЕНТІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ПОКАЗНИКАМИ У КОНТРОЛЬНИХ ТОЧКАХ.....</b>	<b>61</b>
4.1. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РОЗПОДІЛЕНЬ У ПЕРЕРІЗАХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК .....	62

4.1.1. Математична модель теплопередачі у несучих елементах балок при їх вогневих випробуваннях.....	62
4.1.2. Чисельний метод інтегрування рівняння теплопровідності .....	65
4.1.3. Результати розв'язку задачі теплопровідності для перерізу фрагменту дерев'яної балки .....	68
4.2. МЕТОД ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПЕРЕРІЗІ ФРАГМЕНТУ ДЕРЕВ'ЯНОЇ БАЛКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕМПЕРАТУРИ ПІД ЧАС ЇХ ВИПРОБУВАНЬ .....	69
4.2.1. Інтерполяція температурних розподілів вздовж ліній перерізу .....	69
4.2.2. Інтерполяція температурних розподілів у перерізі фрагментів дерев'яних балок .....	72
4.3. ІНТЕРПОЛЯЦІЯ ТЕМПЕРАТУР У ПЕРЕРІЗАХ ФРАГМЕНТІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ПІДДАНИХ ВИПРОБУВАННЯМ .....	75
4.4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБВУГЛЮВАННЯ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ ЇХ ФРАГМЕНТІВ .....	78
4.5. Висновки.....	82
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСТОМ .....</b>	<b>84</b>
5.1. МЕТОД РОЗВ'ЯЗКУ МІЦНІСНОЇ ЗАДАЧІ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСТОМ .....	84
5.1.1. Термомеханічні властивості деревини .....	87
5.1.2. МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ МІЦНІСНОЇ ЗАДАЧІ.....	90
5.2. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗКУ МІЦНІСНОЇ ЗАДАЧІ ЗА СТАНДАРТНИМИ МЕТОДИКАМИ.....	92
5.3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗВ'ЯЗКУ МІЦНІСНОЇ ЗАДАЧІ З ВРАХУВАННЯМ ЗОНИ ОБВУГЛЮВАННЯ .....	98
5.4. МЕТОД РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ПРОСОЧЕННЯМ .....	102
5.5. ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТОДА РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ПРОСОЧЕННЯМ.....	108
5.6. Висновки.....	111
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>113</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>115</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>129</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Забезпечення пожежної безпеки є невід'ємною частиною державної діяльності щодо охорони життя та здоров'я людини, національного багатства і навколишнього природного середовища [1].

Пожежі є серйозною проблемою для багатьох країн світу; кількість пожеж зростає. Одночасно збільшуються економічні, екологічні, соціальні втрати від них, зростає кількість жертв вогню [1].

Серед причин, що сприяють розвитку пожеж, є широке застосування в спорудах деревини, властивості якої пов'язані з легкою займистістю та здатністю підтримувати горіння. Так, 90% випадків пожеж, що мали найбільш тяжкі наслідки, відбувалися на об'єктах культурно-побутового та адміністративного призначення з високим ступенем використання деревини, у вигляді несучих будівельних конструкцій - балок зокрема [2, 3, 4].

Дані конструкції є горючими і при цьому залишаються у числі найбільш поширених для зведення будівель та споруд, не дивлячись на їх істотну пожежну безпеку. При їх захисті від пожежі застосовуються вогнезахисні засоби для зниження горючості. Дані засоби впливають на вогнестійкість дерев'яних конструкцій, зменшуючи величину обвугленої зони під час пожежі. Тим не менше, особливості зміни геометричних параметрів зони обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням в умовах пожежі вивчені недостатньо [5, 6].

На даний час питанню вогнестійкості дерев'яних конструкцій та їх елементів присвячено багато наукових робіт. Значний обсяг теоретичних і експериментальних досліджень викладено в роботах Антонова А.В., Белікова А.С., Горшина С.М., Жартовського В.М., Знаменського Є.М., Кравченка В.І., Поздєєва С.В., Ройтмана М.Я., Сізікова О.О., Силіна В.М., Фоломіна А.І., Фоміна С.Л., Цапка Ю.В., Шналя Т.М., Яковлевої Р.А., Bartelemi B., Forauter A., Harmathy T., Kruppa G., Lie T.T., Silcock G.W.H., White R.H. та інш.

Слід зазначити, що в цих дослідженнях недостатньо приділено уваги прогнозуванню поведінки дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням в умовах дії високих температур та навантаження, оскільки не враховуються особливості зміни геометричних параметрів зони обвуглювання. З огляду на це, дослідження, спрямовані на розкриття питання вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням, залишаються актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження проводилось відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», Постанови Кабінету Міністрів України від 1 липня 2008 року № 870 «Програми забезпечення пожежної безпеки на період до 2018 року», Програми розвитку наукової і науково-технічної діяльності Академії пожежної безпеки на 2013-2018 роки де вказано пріоритетні напрями наукових досліджень науково-педагогічних працівників інституту за напрямком пожежної та техногенної безпеки, а саме: проведення випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій, елементів інженерних мереж та комунікацій, що пов'язано з необхідністю забезпечити задані рівні безпеки і надійність цих об'єктів.

Виконана науково-дослідна робота в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля «Розробка методу оцінки вогнезахисної ефективності несучих дерев'яних будівельних конструкцій» номер державної реєстрації 0114U002707, в якій здобувач була відповідальним виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає в підвищенні точності розрахункового методу оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнегасним просоченням шляхом врахування закономірностей зміни геометричних параметрів їх зони обвуглювання у залежності від часу вогневого впливу пожежі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану методів нормування вогнестійкості дерев'яних балок та визначення класів їх вогнестійкості;
- розробити методика експериментального дослідження поведінки

дерев'яних балок із вогнезахисними просоченнями в умовах вогневого впливу пожежі із стандартним температурним режимом та провести за розробленою методикою відповідні дослідження;

– виявити закономірності зміни геометричних характеристик зони обуглювання дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями у залежності від часу вогневого впливу пожежі із стандартним температурним режимом;

– на основі виявлених закономірностей розробити методику математичного описання зони обуглювання дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями під впливом пожежі із стандартним температурним режимом;

– використовуючи розроблене математичне описання зони обуглювання обґрунтувати розрахунковий метод оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями;

– дослідити ефективність розробленого розрахункового методу оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями і встановити межі його застосування.

**Об'єкт дослідження** – процеси нагрівання та обуглювання дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями при пожежі.

**Предмет дослідження** – вплив зміни геометричних параметрів зони обуглювання на точність оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями.

**Методи дослідження.** Для встановлення основних закономірностей температурних розподілень та параметрів глибини обуглювання використано експериментальні теплофізичні дослідження, результати яких було узагальнено за допомогою математичного моделювання. При розробці розрахункового методу оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням застосовано стандартні методи розрахунку меж вогнестійкості. Для оцінки адекватності результатів експериментів і моделювання теплових процесів в перерізах дерев'яних балок з

вогнезахисним просоченням при тепловій дії пожежі застосовано методи математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– вперше за результатами експериментальних досліджень виявлено закономірності змінення геометричних характеристик зони обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями;

– вперше отримано математичне описання зони обвуглювання вогнезахисних дерев'яних балок під впливом пожежі із стандартним температурним режимом;

– обґрунтовано метод розв'язання міцнісної задачі для оцінки вогнестійкості дерев'яних вогнезахисних балок, що вперше враховує зони обвуглювання;

– обґрунтовано межі застосування розробленого методу врахування конфігурації обвугленої зони в дерев'яних балках з вогнезахисними просоченнями при використанні стандартних методик Єврокоду 5 з огляду на розміри та конфігурацію перерізів цих балок.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у розробці розрахункового методу підвищеної точності для оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями, які набули найбільшого поширення в Україні. Метод оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями може бути використаний як підґрунтя для удосконалення і доповнення відповідної чинної нормативної бази України або розроблення нових нормативних документів.

Розроблений метод впроваджено у технологічні процеси ПАТ «Черкаська меблева фабрики» (акт впровадження від 21.10.2015), використовується в діяльності ТОВ «А.М. Союз» (акт впровадження від 17.11.2015) та в навчальний процес в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України при викладанні дисциплін «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі» і «Пожежна профілактика у населених пунктах» (акт

впровадження від 31.08.2015).

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійною роботою автора. Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві: [75] – здобувачем проведено літературний огляд щодо врахування впливу вогнезахисних просочувальних речовин при визначенні вогнестійкості дерев'яних балок; [85] – здобувачем отримано результати випробувань зразків дерев'яних балок, які пройшли 15, 30 та 60 хвилинні випробування під дією температур за режимом стандартної пожежі; [89] – здобувачем перевірено адекватність результатів, отриманих при застосуванні експериментально-розрахункового методу оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними просоченнями; [92] – здобувачем перевірено діапазон застосування розрахункового методу на дерев'яних балках різних розмірів; [93] – здобувачем досліджені питання впливу експериментальних умов вогневих випробувань вогнезахисних просочувальних речовин при визначенні вогнестійкості дерев'яних клеєних балок; [119] – здобувачем отримано значення глибини обвуглювання зразків дерев'яних балок, які експонувалися при різних часових інтервалах при дії високих температур; [128] – здобувачем проведено аналіз впливу фізико-хімічних процесів випробувань на вогнестійкість дерев'яних клеєних балок з вогнезахисними просоченнями.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Иновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций» (м. Мінськ, 2013); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми технічних та соціально-гуманітарних наук у забезпеченні діяльності служби цивільного захисту» (м. Черкаси, 2013); II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи» (м. Харків 2013); VIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и



перспективы» (м. Мінськ, 2014); 16 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників (м. Київ, 2014); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2015).

**Публікації.** Основний зміст роботи викладено в 4 наукових статтях у виданнях, що входять до переліку ДАК України, та в 1 статті у закордонному виданні, а також у 6 доповідях на вітчизняних та іноземних наукових конференціях.

**Структура дисертації.** Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 134 сторінки. Дисертація містить 17 таблиць, 69 рисунків і 130 найменувань використаних літературних джерел.

## **РОЗДІЛ І**

### **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК**

При забезпеченні вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій відповідно до вимог чинних будівельних норм України пріоритетними є питання щодо методів, які дозволяють прогнозувати та оцінювати вогнестійкість запроектованих та реальних конструкцій. На основі прогнозних даних застосовуються технологічні засоби для підвищення вогнестійкості. До основних технологій забезпечення вимог вогнестійкості та поширення полум'я відносяться вогнезахисні просочення, тому основні аспекти цієї технології також представляють чималий інтерес з огляду на те, що вплив таких просочень на вогнестійкість дерев'яних конструкцій, зокрема дерев'яних балок, вивчений недостатньо. Дана обставина позначилася на комплексі розрахункових методів оцінки вогнестійкості дерев'яних конструкцій, що входять в систему стандартів, чинних в Україні.

#### **1.1. Нормування вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій**

Аналіз статистичних даних [2] показує, що особливої уваги потребують об'єкти громадського, соціально-культурного призначення (адміністративні будинки, театри, видовищні, культурно-спортивні комплекси), в яких перебуває велика кількість людей. Так, в 2013 році на подібних об'єктах України відбулося близько 1700 пожеж. Пожежно-технічна експертиза показала, що травмування та загибель людей в них сталися з причин пошкодження конструкцій і горючості застосованих матеріалів внаслідок пожежі [3] (табл. 1.1).

Згідно статистичних даних [2–4], в Україні щорічно реєструється 40–60 тис. пожеж, що заподіюють в середньому збиток 2100–3500 млн. грн. В середньому гине 3000–3500 осіб, з них 100–150 дітей; ймовірність загибелі

людей через горючість застосованих матеріалів в 4 рази вище, ніж в зв'язку з необережним поводженням з вогнем.

Таблиця 1.1

## Розподіл пожеж в Україні за видами об'єктів у 2013 році

Об'єкти пожеж	Число пожеж,%	Число загиблих у пожежах,%	Прямий матеріальний збиток,%
Будівлі виробничого призначення	4,8	3,2	6,8
Будинки торговельних підприємств	3,1	0,4	10,8
Будівлі сільськогосподарського призначення	1,2	0,3	3,4
Будівлі адміністративно-громадські	1,1	0,3	2,0
Будинки освітніх установ	0,5	0,1	0,8
Будинки лікувально-профілактичних установ	0,3	0,3	0,4
Будинки культурно-видовищних закладів	0,3	0,1	1,9
Будинки дитячих закладів	0,3	0,0	0,2

Як показав аналіз пожеж, однією з причин загибелі людей є невідповідність протипожежним нормам використаних матеріалів і конструктивних рішень, горючість застосованих матеріалів, низька межа вогнестійкості конструкцій.

Не останню роль при визначенні причин, що сприяють розвитку пожеж, є широке застосування в спорудах деревини, властивості якої пов'язані з легкою займистістю та здатністю підтримувати горіння. Збереження несучої здатності дерев'яних будівельних конструкцій при пожежі протягом заданого часу є першорядним завданням, тому, що, як показують дослідження [5, 6], руйнація будівель під час пожежі відбувається внаслідок обвалення несучих елементів в їх каркасі.

З огляду на це виникла необхідність провести аналіз нормативних документів [7–13] для визначення найбільш поширених пожежно-

небезпечних несучих елементів з деревини, за результатами було складено табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Ступінь вогнестійкості конструктивних елементів в будівлях різного призначення

Види будівель	III ступінь вогнестійкості		
	балки	перекриття	колони
Кінотеатри, клуби, центри дозвілля, криті спортивні споруди	R45	–	R30
Будинки дитячих дошкільних закладів	R45	R30	–
Будинки навчальних закладів	R45	R30	–
Будинки та споруди для охорони здоров'я і відпочинку	R45	R30	R30
Будинки та споруди фізкультурно-оздоровчі та спортивні	R45	–	–
Будинки культурно-видовищних, закладів дозвілля та культових закладів	R45	R30	R30
Будинки для підприємств торгівлі та громадського харчування	R45	–	–

З табл. 1.2. можна зробити висновок, що одними з найбільш поширених конструктивних елементів являються балки, оскільки вони достатньо часто використовуються у будівлях і спорудах різного призначення. Для забезпечення межі вогнестійкості балок в багатьох випадках нормами вимагається 45 хвилин за граничним станом втрати несучої здатності.

Згідно [14], вогнестійкість деревини визначається часом (у хвилинах) від початку вогневого випробовування за стандартним температурним режимом до настання одного з граничних станів конструкцій: втрати несучої здатності (R), втрати цілісності (E), втрати теплоізолюючої спроможності (I). Значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій визначають шляхом вогневих випробувань. Межа вогнестійкості, яку повинна мати дерев'яна балка, визначається із необхідного ступеню вогнестійкості (CB) будівлі [14], кожному ступеню вогнестійкості відповідає набір конструкцій (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Конструктивні характеристики будинків залежно від їхнього ступеня  
вогнестійкості

СВ	Конструктивні характеристики
III	Будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1, Г2. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.
IIIб	Будинки переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса – з деревини, піддані вогнезахисній обробці. Огороджувальні конструкції виконують із застосуванням деревини або матеріалів на її основі. Деревина та інші матеріали групи горючості Г3, Г4 огорожувальних конструкцій мають бути піддані вогнезахисній обробці або захищені від дії вогню та високих температур.
IV	Будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з деревини або інших горючих матеріалів, захищених від дії вогню та високих температур штукатуркою або іншими листовими, плитними матеріалами. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості та межі поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Дерев'яні балки, згідно [14], використовують у будівлях III, III б, IV ступенів вогнестійкості.

На теперішній час нормативними документами не передбачено визначення межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням. Це призводить до порушень вимог стосовно забезпечення пожежної безпеки, так як норми вимагають просочення будівельних конструкцій. Одним з найбільш перспективних шляхів раціонального використання деревини є спрямоване поліпшення її властивостей. Широкі можливості для цього відкривають технології, засновані на просоченні деревини різними рідинами, що в свою чергу поліпшують вогнестійкі властивості. При цьому, до методів вогнезахисної обробки висувається

комплекс технологічних та експлуатаційних вимог.

## **1.2. Методи вогнезахисної обробки дерев'яних конструкцій**

### **1.2.1. Вогнезахисні речовини**

Із збільшенням кількості різних видів антипіренів й антисептиків досягнуто високих результатів в забезпеченні вогнезахисту. Поряд з тим, набагато менше досліджувалися питання аналізу конфігурації зони обвуглювання без урахування вогнезахисного просочення і не досліджувалися питання зміни конфігурації зони обвуглювання з його урахуванням та забезпечення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, просочених вогнезахисними речовинами, як методом поверхневого нанесення, так і глибокого просочення.

Призначення того чи іншого виду вогнезахисту будівельної конструкцій залежить від пожежної небезпеки об'єкта, типу будівельних конструкцій (колони, ригелі, балки, стіни і т.д.), температурно-вологісних умов експлуатації і т.д. [7–16].

Вибираючи вогнезахисний склад, необхідно враховувати такі чинники [17–22]:

- тип дерев'яної основи;
- чи задовольняються вимоги відповідних норм;
- нове будівництво чи ремонт та реконструкція;
- умови експлуатації;
- умови нанесення;
- ефективність протягом необхідного терміну експлуатації;
- як впливає на зовнішній вигляд або на інші характеристики дерев'яної основи.

Так як деревина відноситься до горючих матеріалів, то у державних будівельних нормах [14] вказано, що у будинках дерев'яні елементи горючих покриттів (крокви, лаги, балки) та перекриття повинні оброблятися

засобами вогнезахисту, які забезпечують I групу вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98 [23]. Одним із способів зниження горючості деревини є оброблення її вогнезахисними покриттями, що наносяться на поверхні конструкцій, та просочення антипіренами.

Так, поширення полум'я по дерев'яній конструкції призводить до зміни геометричних розмірів в конструкції (вигорання та обвуглювання), проте конструкція тривалий час ще зберігає несучу здатність і тільки по досягненні критичного перетину відбувається її деформування і обвалення [24–26].

Для глибокого просочення деревини в автоклавах рекомендується застосовувати водорозчинні склади типу МС 1:1; МС 3:7; ББ – 11 [27–31].

Деревина, просочена цими сполуками, відноситься до важкогорючих матеріалів.

Склади МС 1:1 і МС 3:7 не змінюють колір деревини, проте сприяють зниженню її міцності на 10%, а контакт просоченої деревини з металом викликає корозію останнього. Дані сполуки рекомендуються застосовувати з відносною вологістю повітря в період експлуатації не вище 80%, схожий склад має вогнебіозахисне просочення Неомід 450-1.

Препарат типу ББ – 11 не змінює колір деревини, підвищує її міцність на стискання уздовж волокон і на поперечний вигин, не викликає корозію металу, володіє біозахисними властивостями, безпечний для людей і тварин, не перешкоджає склеюванню і фарбуванню деревини. Схожий склад вогнебіозахисного просочення мають Сенеж і Страж [32 – 38].

### **1.2.2. Технології просочування**

Для будівельних цілей найчастіше застосовують деревину хвойних порід (модрину, сосну, ялину, кедр) і рідше – деревину листяних.

При виборі деревини для вогнезахисного просочення необхідно враховувати її просочувальну здатність [37, 38–40]:

- в залежності від її призначення повинна задовольняти потреби, які встановлені в нормативних документах на спосіб та засіб вогнезахисту;

-не повинна мати покривів, забарвлень, вологість деревини перед просочуванням повинна бути не більшою, ніж в стандартах і технічних умовах для способів просочування.

Згідно [41–47], встановлено наступні вимоги до способів вогнезахисного просочування: вогнезахисне просочування проводиться всіма способами, необхідними для забезпечення необхідної групи вогнезахисної ефективності; вибір вогнезахисту проводять з урахуванням конструктивних, технологічних і техніко-економічних вимог, які висувають до вогнезахищеної деревини, і в відповідності з умовами її експлуатації; середній коефіцієнт варіації фізико-механічних показників властивостей вогнезахищеної деревини не повинні перевищувати наведених в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

## Середній коефіцієнт варіації показників властивостей деревини

Показник	Коефіцієнт варіації, %
Вміст пізньої деревини	28
Щільність	10
Розбухання: в радіальному і тангенціальному напрямку об'ємному	28
Межа міцності при: стиснення в здовж волокна	13
розтягу в вздовж волокна	20
статичному вигині	15

Просочування деревини розчинами антипіренів або полімерами залежно від кількості та глибини проникання забезпечує її властивості негорючості за місцевого або тривалого впливу високотемпературного джерела вогню. Відмінність такого матеріалу від захищеного методом обмазки або фарбування полягає в тому, що він має підвищений опір впливу вогню не тільки на стадії розвитку пожежі, але і на стадії її повного розвитку [39].

Щоб отримати вогнезахищені дерев'яні матеріали, використовують такі способи просочування [40–49]: просочування під тиском; автоклавно-



дифузійне просочування; просочування в ваннах; поверхнєве просочування; просочування за допомогою суперобмазок.

В усіх випадках використана в будівництві деревина повинна бути сухою - вологість знижує міцність та швидкість обвуглювання деревини. Досліди, здійснені Джонесом [50], виявили, що збільшення вмісту вологості збільшує затримку зростання температури внаслідок витрати енергії на перетворення вологи на пару, внаслідок чого знижується швидкість обвуглювання. Вміст вологості не є постійним. Деревина в будівлях, яка містить менше ніж 20% вологості, не має ніякої захисної дії. При цьому її вологість не повинна перевищувати для конструктивних елементів будівель величини 25%. За даними Лу [51], для нагрівання до температури самозаймання (270 °C) 1 кг деревини з початковою вологістю 20, 30, 40 % необхідно затратити теплоти відповідно в 1,73; 2,09; 2,45 рази більше, ніж для абсолютно сухої деревини. Згідно діючих нормативних документів [14, 52] та європейської норми “ EN 1995-1-2:2004 Eurocode5: Design of timbers tructures – Part 1-2” [53], вологість дерев’яних балок повинна бути 20%.

### **1.3. Поведінка вогнезахищених дерев’яних конструкцій під впливом пожежі**

Дерев’яні будівельні конструкції практично не чинять опору до розповсюдження полум’я та вважаються конструкціями, що згорають. Втрата несучої спроможності дерев’яних конструкцій є результатом обгорання несучих елементів, що призводить до поступового зменшення їх робочого перерізу та зростанню напруження в робочому перерізі при незмінному зовнішньому навантаженні. Граничний стан за міцністю настає в момент, коли напруження в робочому перерізі стають рівними з нормативними. В цьому випадку при нагріві з 4-х боків можна розраховувати несучу здатність у будь-який час.

Деревина має високий вміст кисню, який приймає участь в процесі

горіння разом з киснем повітря. Цим зумовлена властивість деревини до тління. Наявність повітряних включень обумовлює досить низьку теплопровідність деревини та пов'язані з цим швидко займистість та повільне прогрівання внутрішніх шарів.

При нагріванні деревини змінюється її структура, фізичні та хімічні властивості. Характер змін залежить від режиму нагрівання, складу газового середовища та тиску. Компоненти деревини у виділеному стані реагують на термічну дію інакше, ніж всередині мікроструктури. Взаємовплив компонентів при нагріванні достатньо складний [54–60].

Деревина відноситься до матеріалів, горіння яких за відповідних умов може здійснюватись у вигляді тління [61, 62].

Тління – це процес безполуменового горіння твердого матеріалу (речовини), який установлюється за умов недостатнього надходження до матеріалу, що горить, кисню та тепла, та часто супроводжується виділенням диму.

Піроліз деревини супроводжується її перетворенням на деревне вугілля та гази, при цьому знижуючи щільність, а, в результаті, і міцність. При швидкому збільшенні температури до  $150^{\circ}\text{C}$  із деревини випаровується в основному волога, потім починається її розклад з виділенням летких горючих речовин. За температури  $(160\text{--}170)^{\circ}\text{C}$  відбувається як ендотермічна реакція часткового гідролізу, так і екзотермічні процеси ущільнення макромолекул.

При нагріванні деревини до  $(250\text{--}280)^{\circ}\text{C}$  її деструкція (руйнування) розвивається дуже повільно. Подальше збільшення температури призводить до різкого зростання швидкості розкладу, яка досягає максимуму в діапазоні  $(325\text{--}380)^{\circ}\text{C}$ .

В даний час у зв'язку з поширенням клеєних дерев'яних конструкцій набувають практичне значення питання їх вогнестійкості. Водночас відомості про вогнестійкість клеєних дерев'яних конструкцій недостатні для широкого проектування, хоча вогневі випробування досить переконливо говорять про надійність таких конструкцій [63 – 66].

## **1.4. Методи оцінки вогнестійкості дерев'яних балок**

В нормативних документах [53, 67 – 70] розглядаються такі методи оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій: експериментальний метод; розрахунковий метод; експериментально-розрахункові методи.

### **1.4.1. Експериментальні методи**

Експериментальний метод передбачає стандартні вогневі випробування і повномасштабні випробування, що є достатньо громіздкими та дорогими процедурами. Експерименти проводяться в спеціальних вогневих печах протягом визначеного часу при стандартному температурному режимі [53, 71]. Ці методи дозволяють глибоко вивчити процеси та технології експерименту і сконцентрувати увагу на тих параметрах процесу, які представляють найбільший інтерес. При експериментальному методі кожний конкретний процес повинен бути досліджений самостійно. Вони дозволяють встановити часткову залежність між окремими змінними в строго визначених інтервалах їх зміни. Аналіз змінних характеристик за границями цих інтервалів може привести до спотворення залежності і грубих помилок.

При визначенні фактичної межі вогнестійкості більш достовірним і надійним є вогневий метод випробувань. При реалізації даного методу використовують комбіновані нагрівальні вогневі печі і навантажувальні установки. Схема проведення випробувань показана на рис. 1.1. [72 - 74]

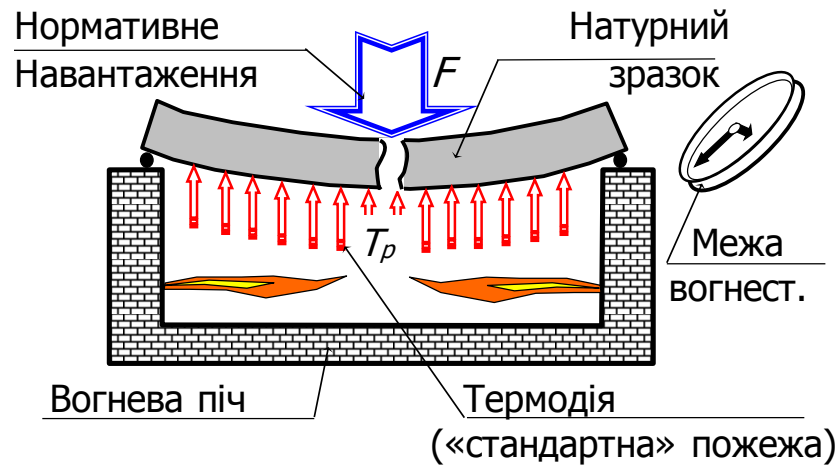


Рис. 1.1. Схема проведення випробувань дерев'яних конструкцій на вогнестійкість

Дані, отримані шляхом проведення таких експериментів, є достовірними, однак процедури достатньо трудомісткі і потребують багато часу. Таким чином, експериментальні методи мають свої переваги, але вказані недоліки часто ускладнюють ефективний розв'язок практичних задач [75].

#### 1.4.2. Розрахункові методи

З розвитком можливостей комп'ютерної техніки все частіше практикується використання розрахункових методів визначення межі вогнестійкості, так як вони (методи) проводяться без натурних зразків, використовуючи тільки програмні продукти.

Розрахункові методи передбачають проведення випробувань шляхом математичного описання тих чи інших закономірностей в експериментальних зразках. Ці методи дешевші в використанні, та їх недоліком на сьогоднішній день залишається невисока точність, приблизно 30% [67, 68, 71]. Розрахункові методи поділяться на різні підгрупи, такі як табличний метод, метод спрощених розрахунків, а також метод уточнених розрахунків.

Табличний метод ґрунтується на розробленні таблиць довідкових

даних з вимогами, виконуючи які можна забезпечити необхідну межу вогнестійкості. Метод спрощених розрахунків дає змогу швидко і приблизно оцінити вогнестійкість будівельних конструкцій. Метод уточнених розрахунків ґрунтується на розгляді математичних моделей, що складаються з основних рівнянь процесів тепломасообміну і напружено-деформованого стану та рівнянь, що визначають початкові та граничні умови, а також коефіцієнтів, що входять до рівнянь. Розв'язання цієї системи рівнянь є аналітично складною задачею. Тому часто для моделювання впливу пожеж використовують різні розрахункові програмні комплекси, такі як Ліра, ANSYS, Femap. Уточнені методи розрахунку для визначення міцності та огорожувальної здатності повинні забезпечувати реальний аналіз конструкцій при пожежі. Вони мають базуватися на основних фізичних властивостях таким чином, щоб досягти достовірного наближення очікуваної поведінки відповідних конструкцій при пожежі.

Уточнені методи можуть бути використані для окремих елементів, частин конструкцій або цілих конструктивних систем. Їх можна застосовувати для:

- визначення глибини обвуглювання;
- визначення розподілів температури в елементах конструкцій (модель теплової реакції);
- оцінки роботи конструкцій або будь-якої її частини (модель конструктивної реакції відгуку) в умовах пожежі.

Уточнені методи розрахунку теплової реакції повинні ґрунтуватися на теорії теплопровідності. Модель теплової реакції, в свою чергу, повинна враховувати зміну температурних властивостей матеріалів в залежності від зміни температури.

Розрахункові методи можна використовувати для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій будь-яких видів, за винятком тих, в яких основним граничним станом з вогнестійкості є втрата цілісності конструкції, а також для оптимізації конструктивних параметрів будівельних

конструкцій з метою забезпечення необхідної вогнестійкості.

Розрізняють два види розрахункових методів:

– методи, засновані на використанні математичних моделей теплового і напруженого станів будівельних конструкцій;

– номограмні методи.

За методами, заснованими на математичних моделях, розв'язанням прямої задачі теплопровідності визначають розподіл температури в конструкції в різні моменти часу від початку вогневого впливу. Отримані величини температури порівнюються з їхніми допустимими значеннями. Виконуючи розрахунки за допомогою математичних моделей, використовують ряд понижувальних коефіцієнтів для властивостей матеріалів. Проте вони не враховують багатьох важливих факторів, таких як повзучість, усадка, фізична і геометрична нелінійність, реальні діаграми розтягу і стиску за дії температури.

З використанням номограмних методів межу вогнестійкості конструкцій визначають за графіками або таблицями, отриманими за результатами випробувань або розрахунковим шляхом.

Існуючі розрахункові методи не враховують наявний вогнезахист будівельних конструкцій і таких питань, як вплив просочувальних речовин на теплофізичні та механічні властивості деревини. Крім цього, дані методи не враховують міцнісні характеристики клеєних з'єднань в елементах несучих конструкцій. Не приділено належної уваги зв'язкам та залежностям вогнезахисту, швидкості обвуглювання деревини.

Найбільш розповсюдженими є методи експериментально-розрахункові, так як вони базуються на даних проведених вогневих випробувань, при цьому достатньо провести випробування двох зразків, а далі розрахунковим методом проводити необхідну кількість експериментів.

Межа вогнестійкості будівельних конструкцій при застосуванні розрахункових методів визначається за ознакою втрати несучої здатності. Вимога до безпечної експлуатації виконана, якщо фактична межа

вогнестійкості більша за встановлену нормами:

$$P_{\phi} \geq P_e, \quad (1.1)$$

де  $P_{\phi}$  - фактична межа вогнестійкості конструкцій;  $P_e$  – межа вогнестійкості встановлена нормативними вимогами безпечної експлуатації.

Для визначення фактичної межі вогнестійкості розрахунковими методами застосовують [69, 71] таку універсальну послідовність процедур.

1. Визначається фактичне навантаження, вид і кількість пожежного навантаження

$$Q_i = Q_{ni} + Q_{vi}, \quad (1.2)$$

де  $Q_{ni}$  – постійне діюче навантаження;  $Q_{vi}$  – тимчасове пожежне навантаження.

2. Визначається температурний режим. Для розрахунків використовують режим стандартної температурної кривої.

3. Визначаються теплофізичні характеристики матеріалу, а також його фізико-механічні властивості.

4. Почерговим вирішенням теплотехнічної та міцнісної задачі визначається час настання граничного стану, тобто коли не виконується умова (1.1)

Існуюча методика має ряд переваг, так як вона достатньо легка в розрахунках, не потребує додаткового обладнання та математичних програм. Але отримані результати мають низьку достовірність, оскільки не враховують особливостей геометричної конфігурації поперечного перерізу з врахуванням обвуглювання деревини.

Схожу методику визначення межі вогнестійкості дерев'яних конструкцій викладено в другій частині проектних будівельних норм Єврокод 5. Ця методика полягає в наступному.

1. Визначаються розрахункові значення механічних властивостей матеріалів та їх опору.

2. Обчислюється розрахункове значення несучої здатності за формулою:

$$R_{d,t,fi} = \eta \frac{R}{\gamma_{M,fi}}, \quad (1.3)$$

де  $R_{d,t,fi}$  – розрахункове значення несучої здатності в умовах пожежі в момент часу  $t$ ;  $R$  – значення несучої здатності при нормальній температурі без врахування впливу тривалості завантаження та вологості (коефіцієнт вологості  $k_{mod} = 1$ );  $\eta$  – коефіцієнт перетворення для зниження несучої здатності при пожежі;  $\gamma_{M,fi}$  – коефіцієнт надійності для деревини при пожежі.

3. Визначаються характеристики міцності та жорсткості за формулами:

$$f = k_{fi} f_k, \quad (1.4)$$

$$S_i = k_{fi} S, \quad (1.5)$$

де  $f$  – характеристика міцності за нормальної температури;  $S_i$  – розрахункова жорсткості (модуль пружності або модуль зсуву) при пожежі;  $S$  – характеристика жорсткості за нормальної температури;  $f_k$  – нормативне значення міцності;  $k_{fi}$  – коефіцієнт міцності визначається згідно з таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Значення коефіцієнту міцності

Цільна деревина	1,25
Клеєна деревина	1,15
Панелі на основі деревини	1,15
Фанеровані пиломатеріали	1,1

4. Проводиться розрахунок навантаження на конструкцію.

Навантаження визначається для здійснення перевірки умови міцності



за необхідної тривалості вогневого впливу  $t$ :

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}, \quad (1.6)$$

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

Як спрощення, ефект впливів  $E_{fi,d,t}$  можна отримати з розрахунку конструкції при нормальній температурі, а саме:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d, \quad (1.7)$$

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

Коефіцієнт послаблення  $\eta_{fi}$  для комбінації навантажень визначають як:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}, \quad (1.8)$$

де  $Q_{k,1}$  – значення змінного навантаження;  $G_k$  – значення постійного навантаження;  $\gamma_G$  – частковий коефіцієнт постійного навантаження;  $\gamma_{Q,1}$  – частковий коефіцієнт змінного навантаження;  $\psi_{fi}$  – коефіцієнт поєднання для частоти значень змінних навантажень в умовах пожежі;  $\xi$  – коефіцієнт ослаблення для несприятливого постійного впливу  $G$ .

5. Виконується розрахунок несучої здатності конструкцій.

Ефективний поперечний переріз визначають зменшуючи початковий поперечний переріз на робочу глибину обвуглювання  $d_{ef}$  (див. рис. 1.2):

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0, \quad (1.9)$$

де  $d_0 = 7$  мм;  $d_{char,n}$  - умовна розрахункова глибина обвуглювання;  $k_0$  - допускається, що матеріал біля лінії обвуглювання елемента в шарі товщиною  $k_0 d_0$  має нульову міцність і жорсткість, тоді як характеристики міцності та жорсткості залишкового поперечного перерізу прийняті незмінними.

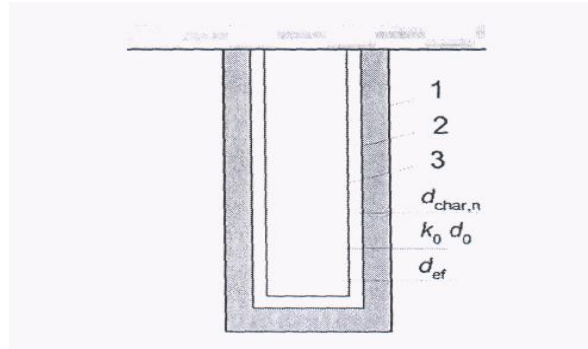


Рис. 1.2. Визначення залишкового і ефективного (робочого) поперечного перерізу: 1 – початкова поверхня елемента; 2 – межа площі залишкового перерізу; 3 – межа площі ефективного (робочого) перерізу

Для визначення швидкості обвуглювання незахищеної м'якої деревини необхідно використовувати співвідношення між швидкістю обвуглювання  $\beta$  і часом  $t$ .

Швидкість обвуглювання  $\beta_{par}$  під час фази нагрівання за кривою параметричного впливу пожежі представлена виразом:

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16\sqrt{\Gamma} + 0,08}, \quad (1.10)$$

де основні параметри визначаються за формулами:

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2}, \quad (1.11)$$

$$O = \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h_{eq}}, \quad (1.12)$$

$$b = \sqrt{pc\lambda}, \quad (1.13)$$

$$h_{eq} = \sum \frac{A_i h_i}{A}, \quad (1.14)$$

де  $O$  - коефіцієнт розкриття отворів,  $m^{0,5}$ ;  $\beta_n$  - умовна розрахункова швидкість обвуглювання,  $mm/xv.$ ;  $A_v$  - загальна площа вертикальних елементів пожежного відсіку,  $m^2$ ;  $A_t$  - загальна площа, що входять до пожежного відсіку,  $m^2$ ;  $A_i$  - площа вертикального розкриття «і-ого шару незахищеної деревини»,  $m^2$ ;  $h_{eq}$  - середня висота всіх вертикальних отворів,  $m$ ;  $h_i$  - висота вертикального розкриття «і-ого шару незахищеної деревини»,  $m$ ;  $\Gamma$  - коефіцієнт, який враховує теплові властивості поверхонь розподілу відсіку;  $b$  - поглинальна здатність огорожуючої конструкції;  $\lambda$  - теплопровідність,  $Вт/мК$ ;  $p$  - щільність,  $кг/м^3$ ;  $c$  - теплоємність,  $Дж/кгК$ .

Кожен з представлених методів визначення межі вогнестійкості включає в себе ряд розрахунків, які є загальними для будь якого матеріалу та конструкцій, що, в свою чергу, потребує конкретизації для визначеного набору конструктивних елементів. При цьому для кожного з наведених методів відсутня можливість врахувати наявність вогнезахисного просочення.

### 1.4.3. Експериментально – розрахункові методи.

Найбільш розповсюдженими є методи експериментально-розрахункові, так як вони базуються на даних проведених вогневих випробувань, що на сьогоднішній день є най достовірніші, при цьому достатньо провести випробування двох однакових зразків за стандартним температурним режимом, а далі розрахунковим методом проводити необхідні розрахунки щодо межі вогнестійкості для необхідної кількості експериментів для набірці бази [76, 77, 78].

### **1.5. Постановка задачі та особливості її розв'язання**

Кожен з представлених методів визначення межі вогнестійкості включає в себе ряд розрахунків які є загальними для будь якого матеріалу та конструкцій, що в свою чергу потребує конкретизації для визначеного набору конструктивних елементів. При цьому для кожного з наведених методів відсутня можливість врахувати наявність вогнезахисного просочення, оскільки дані щодо швидкості обуглювання просоченої деревини дуже обмежені.

В зв'язку з цим, виникла необхідність розробки та проведення експериментальних досліджень поведінки дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням в умовах вогневого впливу при стандартному температурному режимі для виявлення закономірностей зміни геометричних характеристик зони обуглювання дерев'яних балок з подальшим її врахуванням для оцінки їх вогнестійкості .

Виходячи з проведеного аналізу, а також переліку невирішених питань, можна сформулювати основну задачу дослідження у вигляді підвищення точності розрахункового методу оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнегасним просоченням шляхом врахування закономірностей зміни геометричних параметрів їх зони обуглювання у залежності від часу вогневого впливу пожежі.

### **1.6. Висновки**

1. Аналіз нормативних документів вказує на широке використання деревини для будівельних конструкцій, особливо в будівлях III та IIIб ступеня вогнестійкості; 90% пожеж мають при цьому тяжкі наслідки від завалення несучих будівельних конструкцій.

2. Дерев'яні балки повинні забезпечувати фактичну межу вогнестійкості R 45 та R 60 згідно з ДБН В 1.1.7 – 2002 «Захист від пожеж. Пожежна безпека об'єктів будівництва», та інших діючих нормативних документів.

3. Визначення межі вогнестійкості можливе як експериментальними методами, так і розрахунковими. Розрахункові методи є більш дешевими та продуктивними, але мають істотну похибку, обумовлену обмеженістю даних щодо теплофізичних та механічних властивостей деревини, що не дозволяє їх широкого використання. Поведінка дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням в умовах пожежі вивчена недостатньо, що унеможливорює використання розрахункових методів оцінки вогнестійкості для цих балок.

4. Для вогнезахисту дерев'яних балок застосовується велика кількість видів вогнезахисного просочування; їх наявність впливає на швидкість обуглювання деревини. Відсутні порівняльні дані щодо величини швидкості обуглювання деревини без вогнезахисного просочування і деревини з вогнезахисним просоченням, що розповсюджені в Україні. Не вивчено питання щодо впливу наявного вогнезахисного просочування на розпад дерев'яних балок при впливі пожежі на вогнестійкість.

5. Проведений аналіз сучасного стану щодо нормування вогнестійкості дерев'яних балок та методів визначення класів їх вогнестійкості розрахунковим шляхом продемонстрував, що існуючий метод розрахунку має суттєвий недолік, який полягає у неможливості повною мірою відтворити умови зміни геометричних параметрів зони обуглювання, оскільки при цьому не враховується вплив вогнезахисного просочування на конфігурацію обугленої зони.

## **РОЗДІЛ 2**

### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Даний розділ присвячений питанням підготовки до вогневих випробувань, підготовці експериментальних зразків, а також описанню методики проведення вогневих випробувань зразків, які просочені трьома різними вогнезахисними розчинами, за стандартним температурним режимом пожежі. Експеримент складався з двох частин: на першому етапі була підготована матеріальна база для вогневих випробувань, відповідна документація та регламент вогневих випробувань, а також номенклатура зразків; другим етапом було безпосередньо проведення випробувань. Комплекс вогневих випробувань проводився на базі Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України протягом місяця. Основні дані, які мали бути отримані у результаті експерименту, - температурні показники у шарах фрагментів дерев'яних балок, геометричні параметри зони обвуглювання та швидкості їх зростання. Отримані дані є необхідними для визначення закономірностей розвитку зони обвуглювання досліджуваних фрагментів. З метою забезпечення відтворення результатів експерименту одне експериментальне дослідження проводилося не менше ніж на трьох зразках для забезпечення необхідної статистики. Процес глибокого просочування складався з декількох технологічних операцій, що виконувалися методом «вакуум-тиск-вакуум».

#### **2.1. Експериментальне обладнання**

Експериментальне обладнання включає в себе установку для проведення вогневих випробувань за стандартним температурним режимом.

### 2.1.1. Обладнання та матеріали для виготовлення зразків-фрагментів

Для виготовлення зразків було обрано суцільний сосновий брус розміром 50×65×1500 мм, клеєна фанера розмірами 1525×12790 мм та товщиною 16 мм; сушильна камера, установка для глибокого просочення методом «вакуум – тиск – вакуум» [78, 79].

### 2.1.2. Обладнання для проведення вогневих випробувань

Для дослідження впливу вогнезахисних речовин на вогнестійкість деревини використано таке обладнання: розроблена установка з визначення вогнестійкості зразків деревини (рис. 2.1); хромель-алюмелеві термомпари ТХА-VIII у комплекті із Digital multimeter DT 700°C і Digital multimeter DT 838°C; пальник та дерев'яні зразки балок розміром 200×65×400 мм.

Установка для визначення вогнестійкості представляє собою камеру зі сталевого корпусу з розмірами 500×500×500 мм. З тильної сторони камера має отвір діаметром 60 мм для встановлення сопла пальника.



Рис. 2.1. Камера установки для проведення вогневих випробувань деревини

З середини для мінімізації втрати теплоти камера захищена шаром негорючої ізоляції «Conlit 150» фірми «Rockwool» товщиною 100 мм, яка

дозволяє захищати металеві конструкції від дії високих температур до 3-х годин. Нагрівання зразків проводилося через отвір за допомогою газового пальника ГВ «ДОНМЕТ» 231. Інтенсивність подачі газу змінювалася за допомогою регулятора, за рахунок чого підтримувався необхідний температурний режим під час проведення випробування. Пальник складається зі стовбура, з'єднаного з гумовим шлангом (рукавом), який, в свою чергу, з'єднаний з газовим балоном. Горючий газ надходить в пальник по рукаву (тип І по ГОСТ 9356-75) через ніпель, вентиль, патрубок в інжектор. Горючий газ змішується з повітрям всередині мундштука, утворюючи горючу суміш.

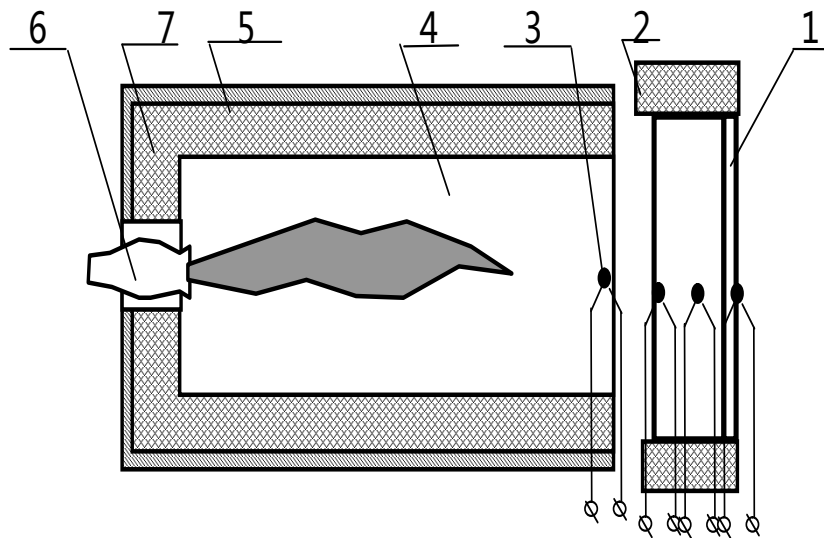


Рис. 2.2. Експериментальна установка для вогневих випробувань зразків-фрагментів дерев'яних балок: 1 – зразок для дослідження, 2 – теплоізоляція зразка; 3 – місця установки термопар; 4 – камера теплового впливу печі; 5 – корпус печі; 6 – газовий пальник; 7 – теплоізоляція камери теплового впливу печі

Під час дослідів вимірювалася і реєструвалася температура в камері теплової дії печі і в 3-х місцях зразка ( рис 2.2 ) з інтервалом не більше 1 хв. Одночасно проводилося спостереження за поведінкою зразків, а саме



виділення диму, процес самозаймання і цілісність зразка. Процес випробувань показано на рис. 2.3.

Для вимірювання температури в печі використовувалися хромель-алюмелеві термопари з діаметром дроту 1,5 мм (рис 2.4), які можна використовувати для вимірювання температури в діапазоні від 0 до 1100 °С.



Рис. 2.3. Процес проведення вогневих випробувань

Для зняття цифрових значень температури в місцях установки термопар використовувалися вторинні електронні прилади у комплекті із Digital multimeter DT 700C і Digital multimeter DT 838C, які були підключені до термопар. Діапазон вимірювання температур даного приладу складає від -20° С до 1370 °С. Похибка становить  $\pm 1.0\%$ .



Рис. 2.4. Термопара ТХА 1-27-К-2-И-320-INC-6-А

### 2.1.3. Устаткування для дослідження структури зразків

Для детального дослідження структури зразків використовувалося таке обладнання:

- мікроскоп біологічний "Биолам-Д-11";
- пінцет;
- штангенциркуль.

### 2.2. Методика виготовлення зразків – фрагментів дерев'яних балок

Для проведення випробувань було обрано суцільний сосновий брус розміром 50×65×400 мм, клеєна фанера розмірами 400×400 мм та товщиною 16 мм. Брус розпилювався на однаково виміряні частини, які склеювалися клеєм резорциновим ФР-12, що найчастіше використовуються в технологічних процесах виготовлення клейових конструкцій, і скріплялися гвіздками  $\varnothing 4 \times 70$  (рис. 2.5) [80 – 84].

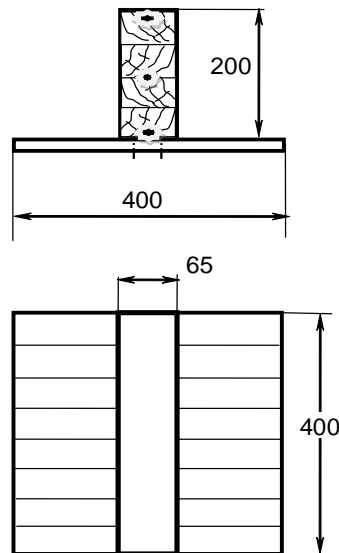


Рис. 2.5. Схематичний вигляд експериментального фрагмента-зразка

Виготовлення зразків було проведено на фірмі «Ognebiozashchita»

(м. Київ). Першим етапом підготовки деревини є сушка, так як високий вміст вологості істотно знижує займистість деревини. Сушка відбувалася на відкритих майданчиках до моменту, коли вологість дерев'яних брусків досягла 20%.

За даними [53, 78], для нагрівання до температури самозаймання (270°C) 1 кг деревини з початковою вологістю 20% необхідно затратити теплоти в 1,73 рази більше, ніж для абсолютно сухої деревини. Вимірювання вологості здійснюється за допомогою електровологоміра згідно з [86].

Другим етапом було глибоке (5-7 мм) просочення зразків вогнезахисними розчинами методом «вакуум – тиск – вакуум».

Просочування складається з таких технологічних операцій: приготування просочувального розчину; завантаження повітряно-сухих дерев'яних брусків в просочувальний циліндр (горизонтальний); створення вакууму в циліндрі (65 мм. рт. ст.) для сосни протягом 50 хв; подавання просочувального розчину в циліндр; створення тиску до 1,1 МПа протягом (8...12) годин при температурі (55...60)°C; створення вакууму; витримка (20...30) хв. для стікання розчину; виймання деталей та їх сушіння.

Дані технологічні операції наведено на рис. 2.6.

Необхідну кількість просочувального розчину для забезпечення вогнезахисту деревини І групи горючості визначають за формулою [73]

$$K = 10^3 \cdot \alpha \rho^{-1} c, \quad (2.1)$$

де  $K$  – необхідна кількість просочувального розчину, % маси деревини;  $\alpha$  – необхідна кількість вогнезахисної речовини, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – концентрація вогнезахисної речовини в просочувальному розчині, %;  $\rho$  – щільність деревини, кг/м<sup>3</sup>.

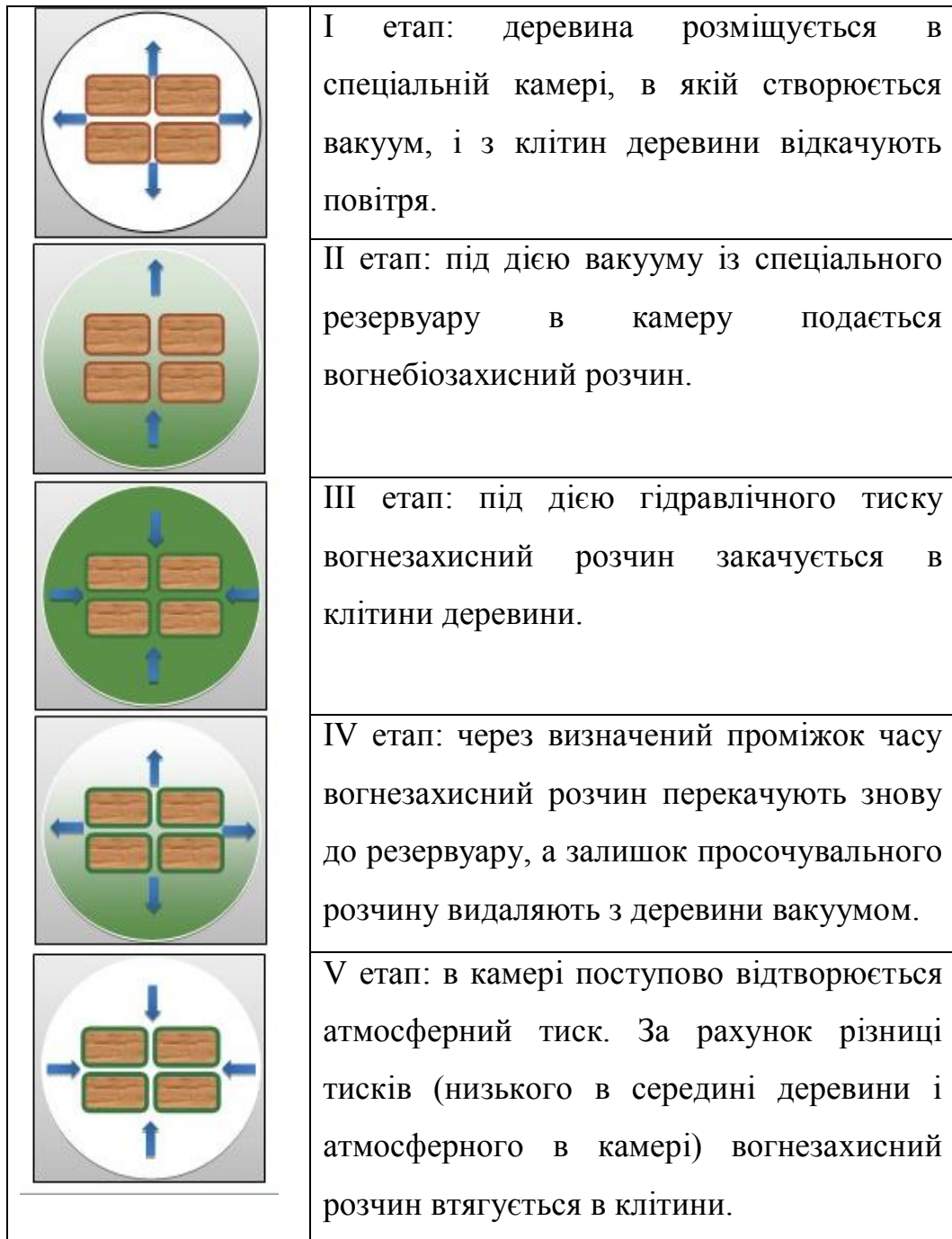


Рис. 2.6. Процес просочення деревини

В комплекс обладнання для просочення (рис. 2.7) входить:

- автоклав з самоущільнюючим люком довжиною 6 м, діаметром 1,6 м;
- резервуар для соляного розчину з перемішувачем;
- гідравлічна станція, насосний вузол, клапани;
- комплекс візків з рейковим шляхом;

- завантажувально-розвантажувальний пристрій;
- пульт управління процесом імпрегнації;
- блок комп'ютерної реєстрації циклу імпрегнації.



Рис. 2.7. Установка для глибокого просочення деревини

Згідно з даними робіт [16, 55; 58; 62; 78] виявлено, що найбільш використовуваними в Україні вогне-біозахисними речовинами для захисту деревини є ББ-32, БС-13, ДСА-1, ДСА-2, Неомід 450-1, Сенеж, які за своїми технічними характеристиками забезпечують найбільший час вогнезахисної дії і економічно вигідні для забудовників, про що можна зробити висновок аналізу даних табл. 2.1 [85].

Тому для досліджень було обрано вогне-біозахисні розчини Неомід 450-1, Сенеж та Страж (рис. 2.8).

На всі три речовини видано сертифікати відповідності Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики «Державна система сертифікація УкрСЕПРО».

Таблиця 2.1

## Порівняльна таблиця вогнезахисних речовин

Назва речовини	„Неомід 450-1”	Страж-2 (БС-13)	Сенеж
Експлуатаційний час в роках	не менш 3-х років	до 10 років	до 5 років
Приблизна вартість в грн./5літрів	250	45	105
Виробник	Росія, м. Санкт-Петербург	Україна, м. Київ	Росія, м. Москва
Група вогнезахисної ефективності	I група	I група	I група
Індекс поширення полум'я поверхнею	L=21 (швидко поширює)	L=0 (не поширює)	L=21 (швидко поширює)
Спосіб нанесення	Гарячо-холодні ванни, автоклав	Гарячо-холодні ванни, автоклав	Гарячо-холодні ванни, автоклав
Значення втрат при поглинанні речовини	0,598 кг/м <sup>2</sup>	0,957 кг/м <sup>2</sup>	0,615 кг/м <sup>2</sup>



а)

б)

в)

Рис. 2.8. Загальний вигляд зразка з просочувальними речовинами: а) «Неомід 450-1» (вогнезахисне просочення I типу); б) «Сенеж» (вогнезахисне просочення II типу); в) «Страж-2 (БС-13)» (вогнезахисне просочення III типу)

### **2.3. Методика досліджень поведінки зразків-фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням і без нього**

Випробування проходило на відкритому майданчику при ясній безвітряній погоді в такій послідовності.

#### 1. Підготовчі процедури:

- монтаж термопар в дерев'яному зразку в кількості 3 шт. (за 2 дні до випробування);
- збірка установки, під'єднання пальника до балона, установка пальника на штатив;
- установка зразка, ретельна теплоізоляція зразка з облаштуванням отвору для виходу продуктів горіння;
- монтаж і підключення вимірювальних приладів до термопар та їх налаштування.

#### 2. Проведення експерименту:

- відкривається вентиль на балоні, розпочинається подача газу на пальник за допомогою регулятора, підпалюється газ;
- пальник встановлюється в отворі, включається секундомір, перевіряється чутливість вторинного приладу термопар, яка знаходиться всередині печі;
- за допомогою регулятора контролюється температурний режим, максимально близький до стандартного, згідно ДСТУ Б В.1.1-4-98 [67];
- знімаються показники через кожну хвилину з чотирьох приладів і заносяться до протоколу протягом 15, 30, 60 хвилин нагрівання.

#### 3. Закінчення експерименту:

- охолодження зразка, візуальне дослідження його поверхні з фотофіксацією, а саме: візуальне дослідження зразка з описом стану зразка, клеєних з'єднань, також відбувався замір шарів обвуглювання на кожній ділянці зразка;
- розбирання установки;

• оформлення протоколів випробувань та занесення отриманих даних для обробки за допомогою програмного продукту Mathcad [87, 88].

#### 2.4. Методика реалізації теплових режимів нагріву зразків

Для реалізації випробувань зразків-фрагментів за методикою пункту 2.3 необхідно забезпечити прогрів серединної точки прямокутного зразка в розрахованому режимі. Для цього потрібно підібрати відповідний режим прогріву камери печі. При виконанні досліджень згідно з п. 2.3 визначається коефіцієнт теплообміну між поверхнею зразка і простором камери печі.

При відомих коефіцієнтах теплообміну підбирається режим прогріву камери печі. Режим прогріву камери печі здійснюється за допомогою термопарі ТХА 1-27-К-2-И-320-INC-6-А-(0...1100)°С.

Відповідно до [53, 75, 85, 89], під час проведення випробування середньооб'ємна температура в печі  $T_f$  повинна змінюватися за стандартним температурним режимом, який визначається залежністю

$$T_p = T_0 + 345 \cdot \lg(8t + 1), \quad (2.2)$$

де  $t$  – час стандартного вогневого випробування, хв.;  $T_0$  – початкова температура середовища, °С ( $T_0 \approx 20^\circ\text{C}$ );  $T_p$  – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій в залежності від часу  $t$  стандартного випробування.

Стандартний температурний режим витримувався в печі за допомогою регулювання інтенсивності подачі палива вентилем на газовому пальнику шляхом контролю відповідності значень, знайдених за формулою (2.2), і показників вторинного приладу термопарі, що знаходилася в камері вогневого впливу. Відхилення не перевищували допустимих значень [67] та розраховувалися за формулою [67, 90]:



$$d = \frac{T_f - T_s}{T_s} \cdot 100\%. \quad (2.3)$$

де  $T_s$  – температура реальної пожежі, °С;  $T_f$  – температура стандартної пожежі, °С.

Допустимі відхилення  $d$  середньої температури в печі  $T_f$  від стандартного температурного режиму не перевищували таких значень:

- 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  $30 < t \leq 60$  хв.

Під час випробувань зразків-фрагментів дерев'яних балок, на окремих термопарах після 10 хв. випробування допускаються відхилення температури від стандартного температурного режиму не більше ніж на 100 °С, це видно з рис. 2.9.

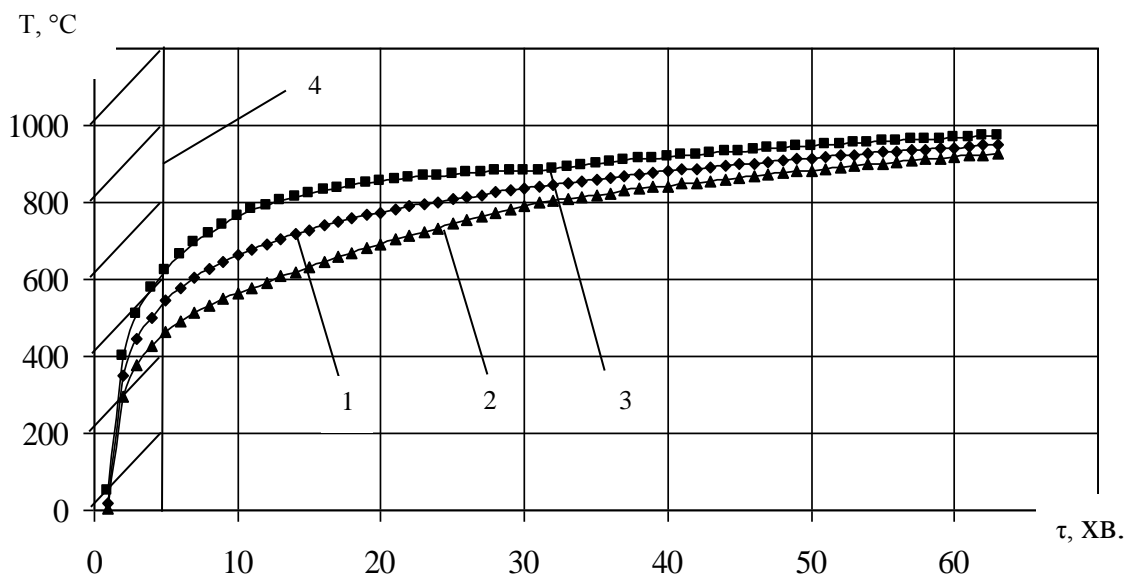


Рис. 2.9. Стандартний температурний режим: 1 – стандартний температурний режим; 2 – нижня допустима межа випробувань; 3 – верхня допустима межа випробувань; 4 – проміжок часу, протягом якого відхилення

середньої температури не контролюване

З метою отримання достовірних результатів експерименту і створення необхідних умов прогріву деревини, піч з боку камери вогневого впливу і сам випробуваний зразок був теплоізолюваний так, як вказано на рис 2.2.

Вогневі випробування проводилися в послідовності з програмою експериментальних досліджень, що наведені в табл. 2.2.[91, 92]

Таблиця 2.2

Номенклатура зразків-фрагментів для випробувань

№п/п	Номер зразка	Вид просочуваної речовини	Час випробувань, хв.
1	1.1.-1.3.	Вогнезахисне просочення I типу	15
2	2.1.-2.3.	Вогнезахисне просочення II типу	15
3	3.1.-3.3.	Вогнезахисне просочення III типу	15
4	4.1- 4.3.	Без вогнезахисту	15
5	1.4.-1.6.	Вогнезахисне просочення I типу	30
6	2.4.-2.6.	Вогнезахисне просочення II типу	30
7	3.4.-3.6.	Вогнезахисне просочення III типу	30
8	4.4.- 4.6.	Без вогнезахисту	30
9	1.7.-1.9.	Вогнезахисне просочення I типу	60
10	2.7.-2.9.	Вогнезахисне просочення II типу	60
11	3.7.-3.9.	Вогнезахисне просочення III типу	60
12	4.7.-4.9.	Без вогнезахисту	60

## 2.5. Висновки

1. Для визначення температур у внутрішніх шарах зразків-фрагментів використовуються в кожній експонованій ситуації три зразки, що складаються з клеєної балки розміром 50x65x200 мм, клеєної фанери розміром 400x400 мм та товщиною 16 мм з вогнезахисними просоченнями I, II, і III типів та без просочення. Для вогнезахисного просочення використовувався метод вакуум-тиск-вакуум із застосуванням

вогнезахисних просочень Сенеж, Страж, Неомід-450-1 з огляду на їх значне розповсюдження в державі.

2. Контроль температур здійснювався в трьох внутрішніх точках зразків та в одній точці у камері спеціальної установки за час експонування протягом 15, 30, та 60 хвилин при стандартному температурному режимі.

3. На основі експериментальних досліджень поведінки дерев'яних балок із вогнезахисними просочуваннями в умовах вогневого впливу пожежі із стандартним температурним режимом протягом 60 хв. виявлено закономірності змінення геометричних характеристик зони обвуглювання дерев'яних балок залежно від часу експонування вогневого впливу пожежі. Запропоновано метод дослідження геометричної конфігурації зони обвуглювання фрагменту дерев'яної балки із вогнезахисним просоченням та без нього на основі вимірювання товщини обвугленої зони. Конфігурація зони обвуглювання контролювалася візуальним оглядом і вимірюванням товщини шару після розпилювання зразків, що були піддані вогневному впливу.

4. Запропоновано методику вивчення розподілення температури лінії перерізу вздовж вертикальної конструкції фрагменту дерев'яної балки. Для визначення дисперсій та інших статистичних параметрів використано дані вимірювань трьох зразків у кожній експериментальній задачі.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

В даному розділі висвітлені питання щодо результатів проведених вогневих випробувань зразків дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням та без нього за стандартним температурним режимом в трьох різних часових проміжках 15, 30, 60 хвилин. Було досліджено поведінку зразків, щоб охарактеризувати вогнезахисні властивості вогнезахисного просочення та визначити ефективний засіб, а також визначені температурні графіки кожного зразка дерев'яної балки. Зняті показники з зразків за сімома параметрами для визначення зони та глибини обвуглювання. Визначена середня бічна та торцева товщина обвуглюваного шару для відтворення розподілів температурного поля в перерізі балок, що дозволить в наступному розділі визначити міцнісні властивості та межу вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням .

#### **3.1. Результати вогневих випробувань фрагментів дерев'яних балок з вогнезахистом**

Дерев'яні балки повинні відповідати не тільки вимогам міцності, жорсткості але й вимогам пожежної безпеки. Під дією високих температур пожежі знижується міцність дерев'яних конструкцій, інколи відбувається їх повна руйнація, тому забезпечення межі вогнестійкості дерев'яних балок являється актуальною задачею.

Результати експонування зразків-фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням представлено на рис. 3.1 – рис. 3.3 для відповідних часових проміжків в 15, 30, 60 хвилин [91, 92]. Загальні характеристики для всіх зразків під час випробування – середня температура до початку випробувань на трьох термопарах, які були влаштовані в зразках-

фрагментах, становила  $15^{\circ}\text{C}$ , а початкова середня температура в камері нагріву дорівнювала  $19^{\circ}\text{C}$ . Станом на першу хвилину вогневих випробувань температура в камері печі становила  $348^{\circ}\text{C}$ , а на останній –  $739^{\circ}\text{C}$  для 15 хвилинних,  $842^{\circ}\text{C}$  – для 30 хвилинних та  $966^{\circ}\text{C}$  – для 60 хвилинних вогневих випробувань за стандартним температурним режимом, який обраховано за формулою (2.2); відхилення експериментальної температури лежить в межах діапазону  $100^{\circ}\text{C}$ .

Під час проведення комплексу 15 хвилинних вогневих випробувань спостерігалася така поведінка зразків-фрагментів: зразки без просочення мали температурний діапазон від  $18^{\circ}\text{C}$  на першій хвилині до  $136^{\circ}\text{C}$  на останній хвилині на першій термопарі (розташування термопар див. рис. 2.5), на другій термопарі – від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $99^{\circ}\text{C}$ , на третій термопарі – від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ , при цьому наростання температури відбувалося поступово і рівномірно, не було зафіксовано самозаймання, виділення диму було не велике.

Зразки, просочені вогнезахисним просочення I типу, мали вищі температурні діапазони, а саме: на першій термопарі діапазон від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $220^{\circ}\text{C}$ , на другій від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $101^{\circ}\text{C}$ , на третій від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $35^{\circ}\text{C}$ , що характеризує вогнезахисне просочення з низькою вогнезахисною здатністю. Спостереження за термопарами показали, що на 3 і 7 хвилинах були температурні стрибки в  $10^{\circ}\text{C}$ , і на 7 хвилині відбувалося самозаймання без подальшого горіння. В період від 5 до 15 хвилин зразки виділяли велику кількість їдкого густого диму та гарі. Хоча в порівнянні з зразками без просочення, в цих зразках не відбувалося швидкого зростання температури і візуально зразки виглядали менш обвугленими.

Зразки, просочені вогнезахисними розчинами II типу, в 15 хвилинному часовому інтервалі не виділяли диму, наростання температури відбувалося поступово і помірно, про що свідчать температурні діапазони для першої термопарі від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $110^{\circ}\text{C}$ , на другій термопарі – від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $57^{\circ}\text{C}$ , на третій термопарі – від  $18^{\circ}\text{C}$  до  $32^{\circ}\text{C}$ , випадків самозаймання не

спостерігалось, що, в свою чергу, може охарактеризувати цю речовину, як таку, що забезпечує утримання температури в зразку при вогневому впливі за стандартною температурною кривою протягом часу експонування.

Зразки, просочені вогнезахисним розчином III типу, поводити себе аналогічно вогнезахисному просоченню II типу і мали ще нижчий температурний діапазон, що характеризує це просочення як найефективніше.

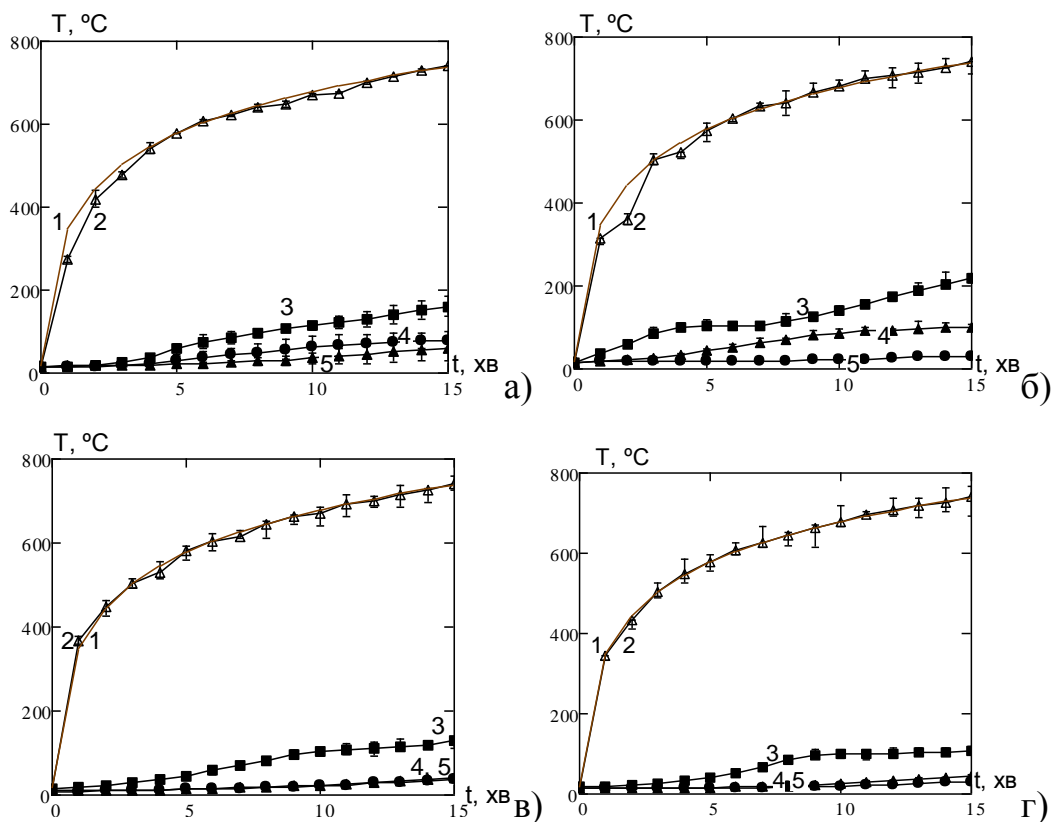


Рис. 3.1. Графіки залежності температури від часу експонування при 15 хвилинних вогневих випробувань: 1 – стандартна температурна крива; 2 – середнє значення температури у камері установки; 3 – середня температура у першій внутрішній контрольній точці зразка; 4 – середня температура у другій внутрішній контрольній точці зразка; 5 – середня температура у третій внутрішній контрольній точці зразка; а) зразки без просочування; б) зразки з вогнезахисним просоченням I типу; в) зразки з вогнезахисним просоченням II типу; г) зразки з вогнезахисним просоченням III типу

Комплекс 30 хвилинних вогневих випробувань дав більш чітке уявлення поведінки зразків-фрагментів дерев'яних балок під час пожежі, що видно на графіках рис. 3.2.

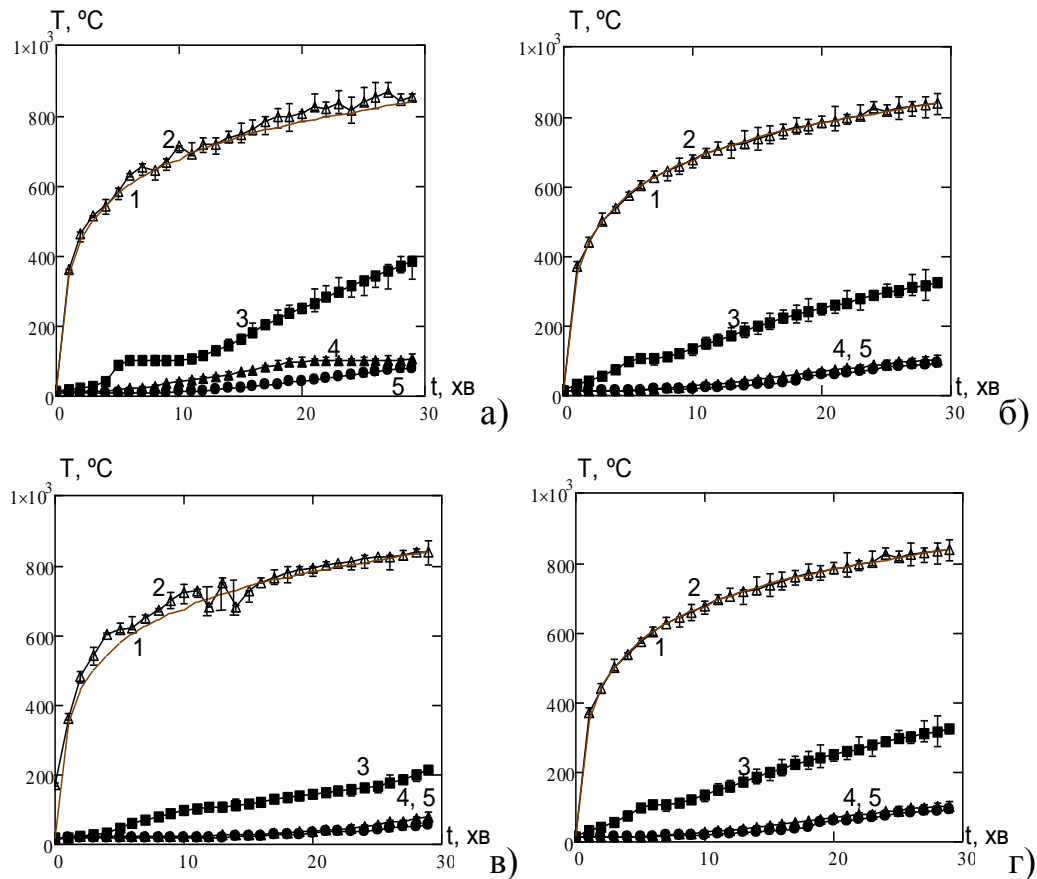


Рис. 3.2. Графіки залежності температури від часу експонування при 30 хвилинних вогневих випробувань: 1 – стандартна температурна крива; 2 – середнє значення температури термопар для визначення режиму температури в установці; 3 – середнє значення температури першої термопарі; 4 – середнє значення температури другої термопарі; 5 – середнє значення температури третьої термопарі; а) зразки без просочування; б) зразки з вогнезахисним просоченням I типу; в) зразки з вогнезахисним просоченням II типу; г) зразки з вогнезахисним просоченням III типу

На рис. 3.2 можна побачити, що зразки-фрагменти дерев'яних балок без просочування поводити себе аналогічно до експериментальних

досліджень в 15 хвилинному часовому інтервалі. Зміна температури відбувалася з однаково швидким наростанням, без виділення диму та самозаймання, і діапазон середніх температур на першій термопарі складав від 19°C до 389°C, на другій – від 19°C до 214°C, на третій – від 19°C до 96°C.

Зразки-фрагменти дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням I типу на 5 хвилині випробувань мали температурний стрибок і за ним швидке наростання температури, що в свою чергу призвело до самозаймання на 17 хвилині випробувань, що видно з рис. 3.2 б. Температура на кожних термопарах протягом вогневих випробувань мала такий діапазон: на першій термопарі – від 20°C до 297°C, на другій – від 20°C до 102°C, на третій – від 20°C до 96°C. Протягом всього часу експерименту виділявся густий, їдкий дим. Дані температур перевищують середні значення температури для зразків без просочення, що свідчить про низьку здатність вогнезахисного просочення I типу.

Зразки-фрагменти дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням II типу під час експерименту не зазнавали значних вогневих впливів, хоча на 8 хвилині спостерігався температурний стрибок (див. рис. 3.2 в), при цьому не відбувалося самозаймання, середній діапазон температур: на першій термопарі був від 25°C до 246°C, на другій – від 25°C до 104°C, на третій – від 25°C до 95°C. Вони не виділяли диму, наростання температури було повільне.

Зразки – фрагменти дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням III типу під час експерименту не зазнали значних ушкоджень, спостерігався і виділявся не густий дим без запаху, діапазон середніх температур для кожної термопари: для першої від 20°C до 203°C, для другої від 20°C до 98°C, для третьої від 20°C до 87°C.

Спостереження за температурою дає можливість говорити про ефективність III типу вогнезахисного просочення, оскільки воно найдовше перешкоджає дії вогню.



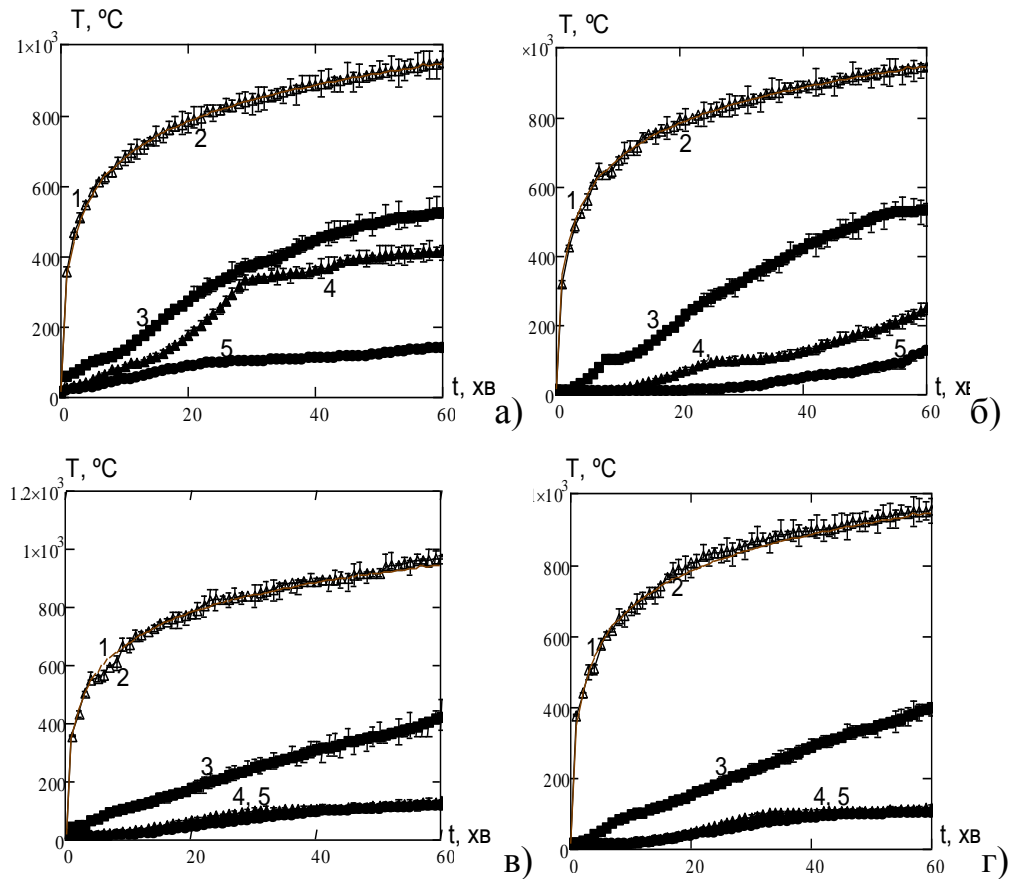


Рис. 3.3. Графіки залежності температури від часу експонування при 60 хвилинних вогневих випробувань: 1 – стандартна температурна крива; 2 – середнє значення температури термопар для визначення режиму температури в установці; 3 – середнє значення температури першої термопарі; 4 – середнє значення температури другої термопарі; 5 – середнє значення температури третьої термопарі; а) зразки без просочування; б) зразки з вогнезахисним просоченням I типу; в) зразки з вогнезахисним просоченням II типу; г) зразки з вогнезахисним просоченням III типу

В блоці 60 хвилинних вогневих випробувань, які представлені на рис. 3.3, спостерігалася наступна поведінка зразків. Зразки-фрагменти дерев'яних балок без просочення і зразки-фрагменти з вогнезахисним просоченням I типу поводити себе практично однаково: швидке наростання температури на всіх термопарах – на першій термопарі, яка розташована в

зразку-фрагменту найближче до вогневого впливу: без просочення – від 30°C до 589°C, для просочення I типу – від 26°C до 524°C, що свідчить про низьку вогнезахисну властивість просочення. На другій термопарі, яка вимірювала температуру в середині зразка: для зразків без просочення – від 30°C до 248°C, для зразків з вогнезахисним просоченням I типу – від 26°C до 231°C. На третій термопарі: для зразків без просочення – від 30°C до 119°C, для зразків з вогнезахисним просоченням I типу – від 26°C до 120°C, про що свідчать графіки рис. 3.3 а, б. Зовнішній вигляд зразків-фрагментів: на 80 % вони ушкоджені вогнем до утворення деревного вугілля. Тому можна зробити висновки про низьку вогнезахисну і вогнестійку здатність даної речовини.

Зразки-фрагменти з вогнезахисним просоченням III типу характеризуються високою вогнезахисною і вогнестійкою властивістю, оскільки середні значення температур на трьох термопарах мають найменші показники, а саме: перша – від 20°C до 380°C, друга – від 20°C до 199°C, третя – від 20°C до 102°C, а також виділявся негустий дим.

### 3.2. Визначення швидкості обуглювання фрагментів балок

Умовна швидкість обуглювання – це величина, яка враховує ефект заокруглення кутів та наявність тріщин (рис. 3.4), приймається сталою в часі. Умовна розрахункова глибина обуглювання розраховується як:

$$d_{char,n} = \beta_n t, \quad (3.1)$$

де  $d_{char,n}$  – умовна розрахункова глибина обуглювання, яка враховує вплив заокруглених граней;

$\beta_n$  – умовна розрахункова швидкість обуглювання, яка враховує вплив заокруглення граней та тріщин.

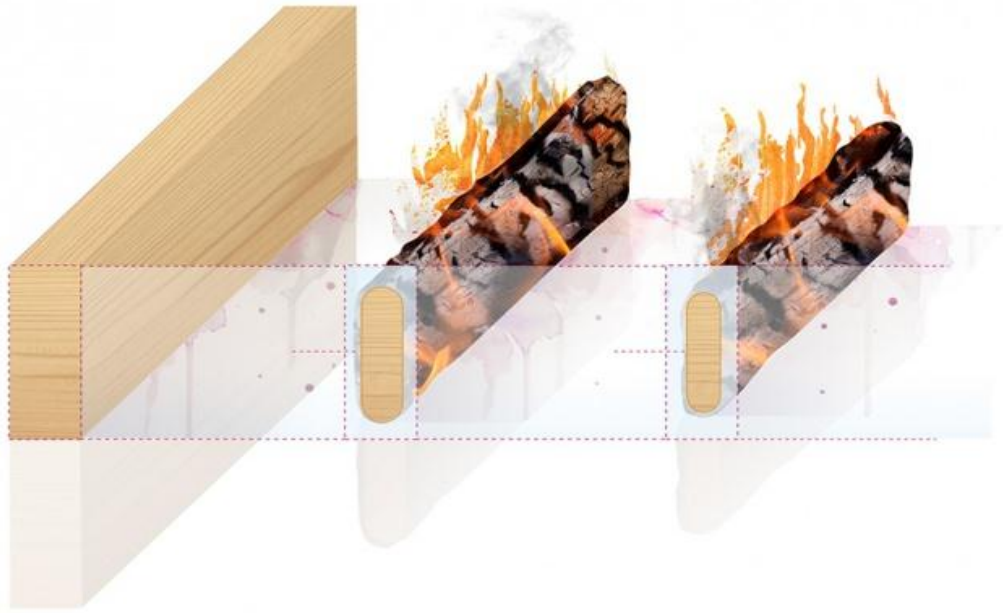


Рис. 3.4. Глибина обуглювання  $d_{char,o}$  для одновимірного обуглювання та умовна глибина обуглювання  $d_{char,n}$

Одновимірну розрахункову швидкість обуглювання застосовують за умови, що збільшення обуглювання біля кутів враховують для поперечних перерізів з початковою мінімальною шириною  $b_{min}$  [53]

$$b_{min} = \begin{cases} 2d_{char,o} + 80, & \text{для } d_{char,o} \geq 13\text{mm}; \\ 8,15d_{char,o}, & \text{для } d_{char,o} < 13\text{mm}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Коли найменша ширина поперечного перерізу є меншою ніж  $b_{min}$ , необхідно застосовувати в розрахунках умовну розрахункову швидкість обуглювання. Ці дані вказані на табл. 3.1.

Для поперечних перерізів, які розраховуються з використанням одновимірної розрахункової швидкості обуглювання, радіус заокруглення кутів приймають таким, що дорівнює глибині обуглювання  $d_{char,n}$ .

Для зразків, не просочених вогнезахисною речовиною, розрахункові швидкості обуглювання визначалися як експериментально, так і порівнювалися з табличними даними, наведеними нижче [53].

Таблиця 3.1

Розрахункові швидкості обвуглювання  $\beta_0$  і  $\beta_n$  для деревини, фанерованих матеріалів (LVL), дерев'яної обшивки та панелей на основі деревини

	$\beta_0$ , мм/хв.	$\beta_n$ , мм/хв.
а) М'яка деревина і бук		
Клеєна деревина з характеристичною щільністю $\geq 290$ кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,7
Цільна деревина з характеристичною щільністю $\geq 290$ кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,8
б) Тверда деревина		
Цільна або клеєна тверда деревина з характеристичною щільністю $290$ кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,7
Цільна або клеєна тверда деревина з характеристичною щільністю $\geq 450$ кг/м <sup>3</sup>	0,50	0,55
в) Фанеровані пиломатеріали (LVL) з характеристичною щільністю $\geq 480$ кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,7

Фактичний залишковий переріз отримують, віднімаючи розраховану фактичну глибину обвуглювання від усієї експонованої до вогню поверхні дерев'яного елемента. Впливом кутів елемента під час обвуглювання нехтують.

### 3.3. Оцінка товщини шару обвуглювання за результатами проведеного експерименту

Розрахункова глибина обвуглювання визначалася як середня величина глибин обвуглювання, визначених за виміряними параметрами обвугленого шару.

Для дослідження обвуглювання проведені експерименти, в якості об'єкту досліджень використовували фрагмент дерев'яної балки з глибоким просочуванням вогнезахисними розчинами різних складів, виконаними згідно [45]. Частковий фрагмент балки, узятий в якості зразка для випробувань, показаний на рисунку 2.3 [93].

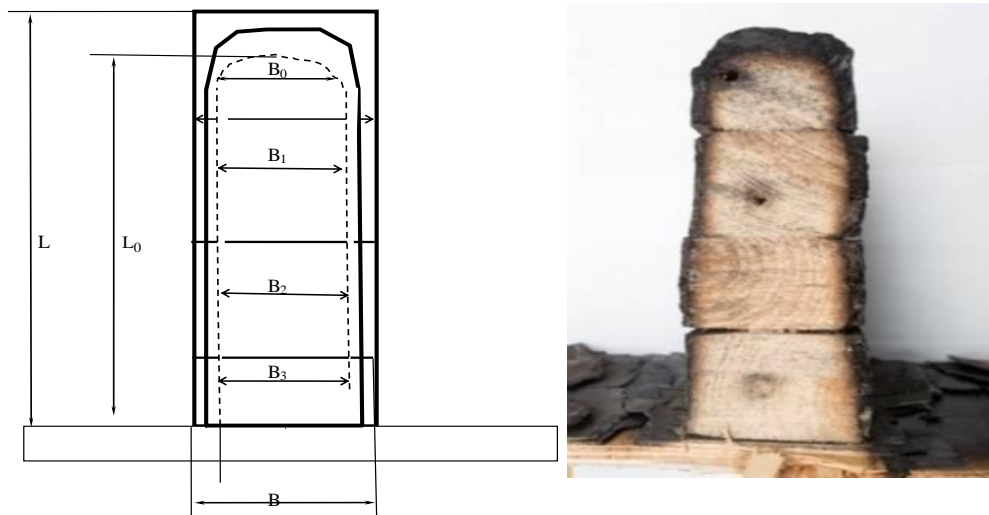


Рис. 3.5. Схематичне зображення вимірювальних ділянок на зразку:  $L$  – довжина зразка до початку випробування;  $L_0$  – довжина не обугленого шару зразка;  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  – ширина на кожному фрагменті клеєного бруска після проведення вогневого випробування;  $B$  – ширина зразка до проведення вогневого випробування

В табл. 3.2 та рис.3.5 представлено глибину обуглювання фрагментів зразків після проведених вогневих випробувань за стандартним температурним режимом, що підтверджує гіпотезу залежності глибини просочення дерев'яних балок від вогнезахисних і вогнестійких властивостей просочувальної речовини і часового проміжку вогневого впливу на зразки. Згідно рис. 3.5 проводилися заміри глибини обуглювання експериментальних зразків по ширині зразка та його висоті за допомогою штангенциркулю та лупи.

Таблиця 3.2

## Значення товщини шару обвуглювання

	Номер зразка	Час експ., хв.	B <sub>0</sub> , мм	B <sub>1</sub> , мм	B <sub>2</sub> , мм	B <sub>3</sub> , мм	B, мм	L, мм	L <sub>0</sub> , мм
Без просочення	4.1	15	43	45	46	49	65	200	188
	4.2		50	50	50	53	65	200	187
	4.3		43	43	45	48	65	200	186
	4.4	30	52	54	55	57	65	200	179
	4.5		50	52	53	55	65	200	184
	4.6		57	58	59	59	65	200	185
	4.7	60	21	23	24	33	65	200	145
	4.8		10	11	16	23	65	200	123
	4.9		19	45	46	56	65	200	163
Вогнезахисне просочення I типу	1.1	15	50	55	57	58	65	200	199
	1.2		46	55	59	61	65	200	186
	1.3		54	57	57	59	65	200	191
	1.4	30	47	52	54	54	65	200	194
	1.5		49	50	59	59	65	200	189
	1.6		41	45	47	51	65	200	185
	1.7	60	30	40	44	46	65	200	165
	1.8		34	44	46	47	65	200	173
	1.9		22	41	47	55	65	200	183
Вогнезахисне просочення II типу	2.1	15	52	54	55	59	65	200	188
	2.2		55	57	58	58	65	200	193
	2.3		48	53	58	58	65	200	186
	2.4	30	46	49	54	54	65	200	186
	2.5		50	54	54	56	65	200	184
	2.6		54	54	57	58	65	200	184
	2.7	60	40	47	50	52	65	200	183
	2.8		23	50	50	53	65	200	182
	2.9		27	44	46	48	65	200	182
Вогнезахисне просочення III типу	3.1	15	50	57	59	62	65	200	198
	3.2		55	57	57	60	65	200	197
	3.3		55	56	59	62	65	200	196
	3.4	30	51	54	56	59	65	200	194
	3.5		50	52	53	55	65	200	195
	3.6		54	56	57	59	65	200	194
	3.7	60	49	51	52	54	65	200	188
	3.8		54	58	59	62	65	200	190
	3.9		23	53	53	55	65	200	188

Загальний вигляд всіх зразків після проведення вогневих випробувань за різний час експонування для візуального порівняння, а також для створення експериментальної бази із поведінки зразків-фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням та без нього, наведені на рис. 3.6.

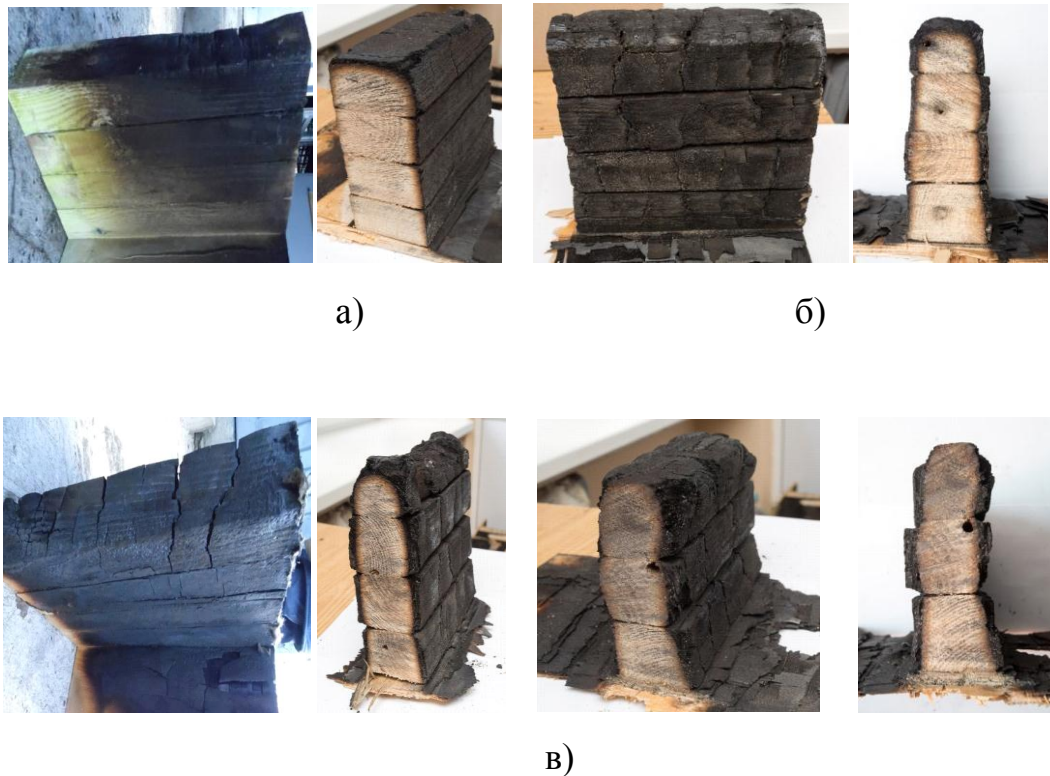


Рис. 3.6. Фото зразків після проведення вогневих випробувань: а) обуглювання зразка після 15 хвилинних вогневих випробувань; б) обуглювання зразка після 30 хвилинного вогневого випробування; в) обуглювання зразка після 60 хвилинного вогневого випробування

Використовуючи вимірювання, була обчислена середня бічна товщина і середня торцева товщина обугленого шару, графіки залежностей від часу експонування яких наведено на рис. 3.7.

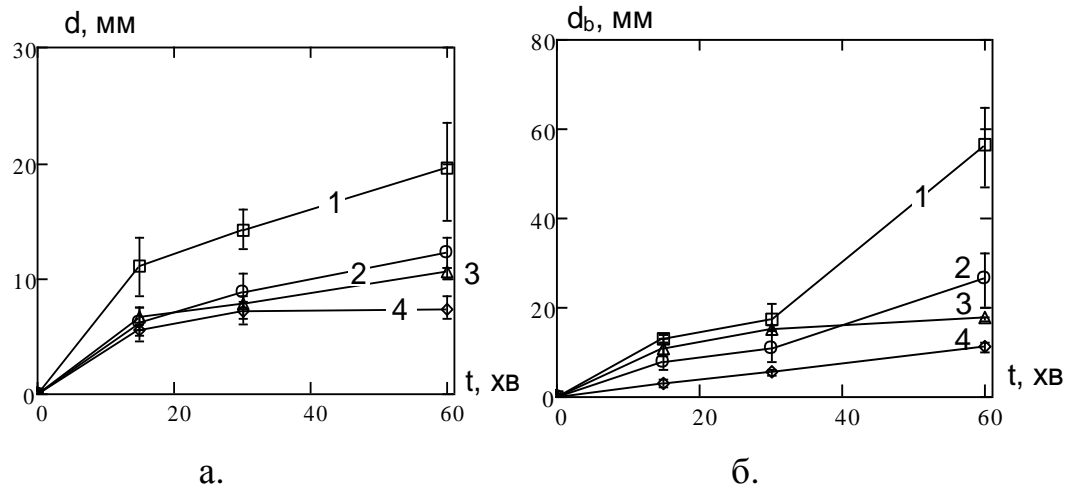


Рис. 3.7. Графіки залежностей бічних (а) і торцевих товщин (б) обвугленого шару від часу експонування зразків: 1 – без просочення; 2 — з вогнезахисним просоченням I типу; 3 – з вогнезахисним просоченням II типу; 4 – з вогнезахисним просоченням III типу

На рис. 3.8. показані графіки швидкості обвуглювання зразків.

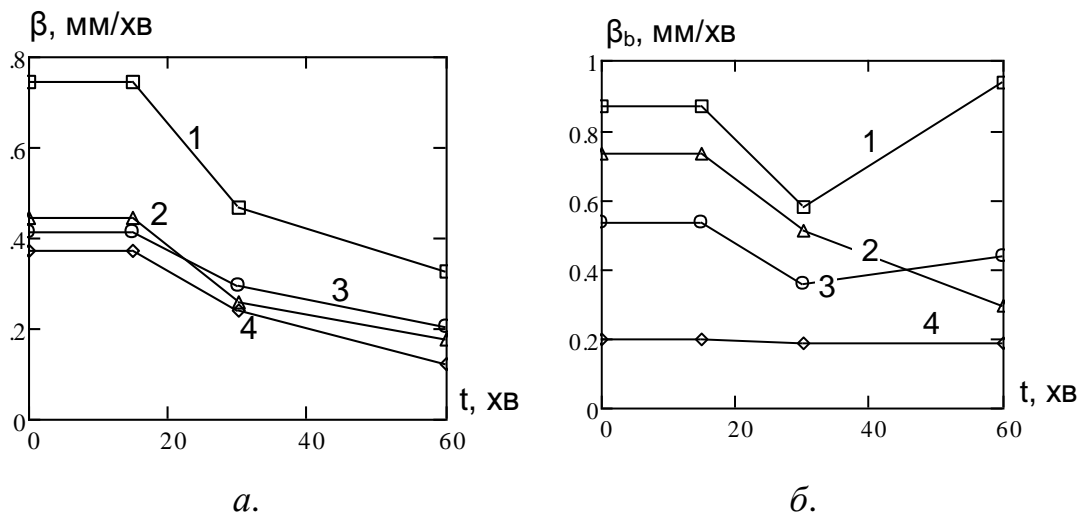


Рис. 3.8. Залежність бічних (а) і торцевих (б) швидкостей обвуглювання від часу експонування зразків: 1 – без просочення; 2 – з вогнезахисним просоченням I типу; 3 – з вогнезахисним просоченням II типу; 4 – з вогнезахисним просоченням III типу

Таким чином, нами були визначені температурні розподіли у перерізі



фрагменту дерев'яної балки, який був підданий випробуванням з використанням рекомендацій, що містять відповідний стандарт [53] щодо розрахункових методів оцінки вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій.

Отримані експериментальні дані були апроксимовані у вигляді поліномів. Параметри регресійних залежностей наведено в табл. 3.3 та табл. 3.4.

Таблиця 3.3

Параметри регресійних залежностей бокової товщини обвуглювання від часу експонування для зразків

Коефіцієнти регресії $d(t) = b_1 + b_2t + b_3t^2 + b_4t^3$	$b_1$ , мм	$b_2$ , мм·хв. <sup>-1</sup>	$b_3$ , мм·хв. <sup>-2</sup>	$b_4$ , мм·хв. <sup>-3</sup>
без просочення	0.662	0.673	-6.01·10 <sup>-3</sup>	0
з просоченням І типу	0	0,585	-0,013	1,111
з просоченням ІІ типу	0.47	0.384	-3.648·10 <sup>-3</sup>	0
з просоченням ІІІ типу	0	0,561	-0,014	1,145·10 <sup>-4</sup>

Таблиця 3.4

Параметри регресійних залежностей торцевої товщини обвуглювання від часу експонування для зразків

Коефіцієнти регресії $d(t) = b_1 + b_2t + b_3t^2 + b_4t^3$	$b_1$ , мм	$b_2$ , мм·хв. <sup>-1</sup>	$b_3$ , мм·хв. <sup>-2</sup>	$b_4$ , мм·хв. <sup>-3</sup>
без просочення	1.536	0.353	9.192·10 <sup>-3</sup>	0
з просоченням І типу	0.718	0.336	1.448·10 <sup>-3</sup>	0
з просоченням ІІ типу	0	1.031	-0.022	1.687·10 <sup>-4</sup>
з просоченням ІІІ типу	0.036	0.192	-6.73·10 <sup>-5</sup>	0

На рис. 3.9 графіки отриманих регресійних залежностей бічних товщин шару обвуглювання фрагментів дерев'яних балок для трьох вогнезахисних просочень, а також для фрагментів без просочення подані двома кривими: одна отримана експериментальним шляхом за стандартним температурним режимом, а інша – методом регресійних залежностей.

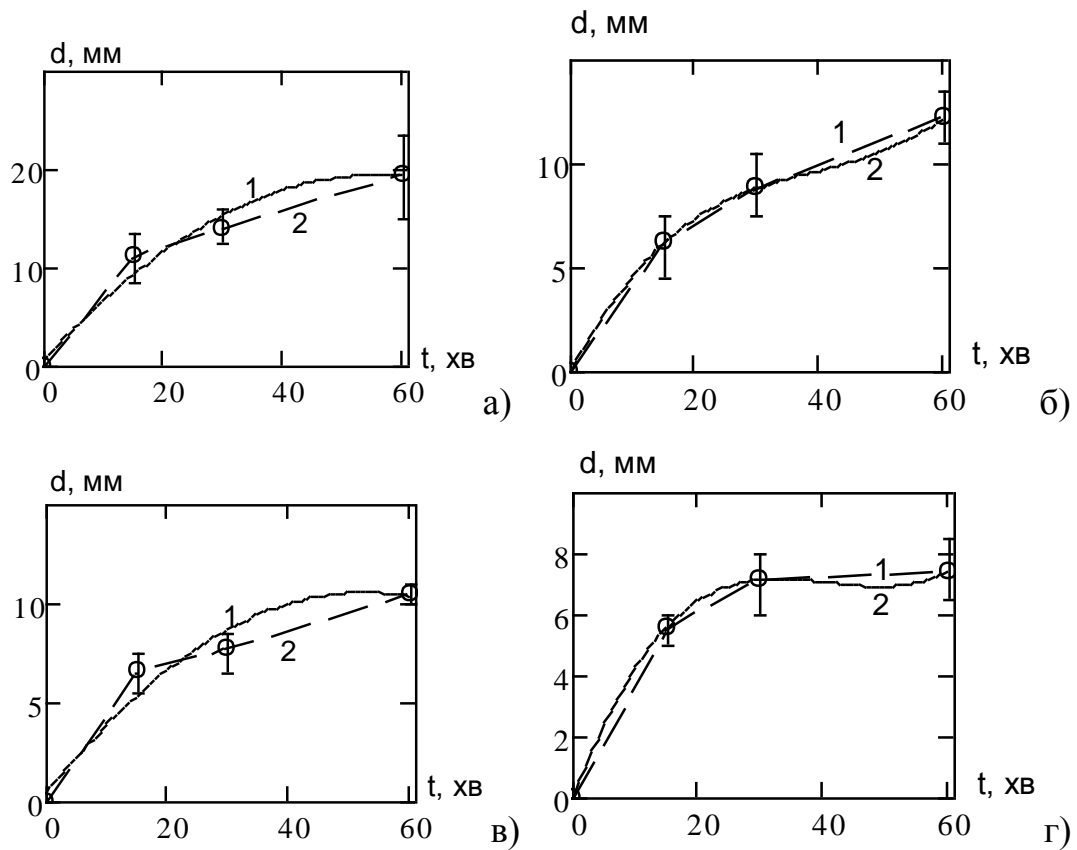


Рис. 3.9. Залежності бічної товщини обвугленого шару фрагментів без вогнезахисту (а), фрагменту із вогнезахисним просоченням I типу (б), фрагменту із вогнезахисним просоченням II типу (в), фрагменту із вогнезахисним просоченням III типу (г): 1 – експериментальна залежність; 2 – регресійна залежність

На рис. 3.10 подано графіки отриманих регресійних залежностей торцевих товщин шару обвуглювання фрагментів для випадків, аналогічних до рис. 3.9.

Залежності швидкості обвуглювання від часу були отримані шляхом диференціювання регресійних залежностей, наведених в табл. 3.3 та табл. 3.4.

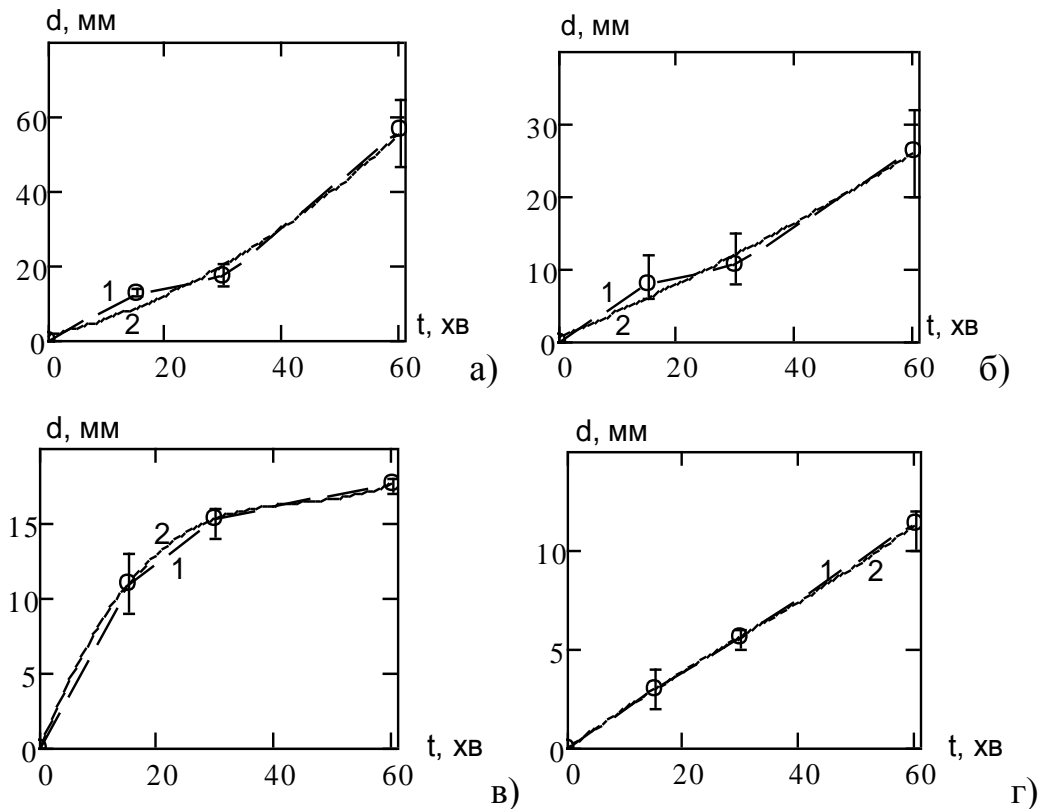


Рис. 3.10. Залежності торцевої товщини обвугленого шару фрагментів без вогнезахисту (а), фрагменту із вогнезахисним просоченням I типу (б), фрагменту із вогнезахисним просоченням II типу (в), фрагменту із вогнезахисним просоченням III типу (г): 1 – експериментальна залежність; 2 – регресійна залежність

### 3.4. Висновки

1. Проведені дослідження дозволили визначити закономірності зміни температури у внутрішніх шарах фрагментів дерев'яних балок залежно від часу їх експонування за стандартним температурним режимом пожежі.

2. Визначено закономірності зміни бокової та торцевої товщини обвугленого шару, відповідних швидкостей обвуглювання фрагментів дерев'яних балок залежно від часу їх експонування за стандартним температурним режимом пожежі. Визначено регресійні залежності бокової та торцевої товщини та обвугленого шару.

3. Виявлено відмінності температурних розподілів у різний часовий інтервал впливу пожежі із стандартним температурним режимом для фрагментів дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням та без нього. Балки із вогнезахисним просоченням прогріваються повільніше, що впливає на їх вогнестійкість.

4. Виявлено, що зона обуглювання балок із вогнезахисним просоченням відрізняється від зони обуглювання балок без вогнезахисного просочення і на останніх етапах нагріву може бути вдвічі меншою.

5. Показано, що отримані результати експерименту не суперечать теоретичним уявленням про процеси нагріву та обуглювання дерев'яних балок із просоченням та без нього.

6. Визначено дисперсії результатів вимірювань і показано, що дані результати є вірогідними.

7. Виявлено залежності показника степені інтерполяційної параболічної функції для визначення температурних полів дерев'яних балок від часу експонування дерев'яних балок за стандартним температурним режимом пожежі протягом 60 хв.

## РОЗДІЛ 4

### МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПЕРЕРІЗІ ФРАГМЕНТІВ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ПОКАЗНИКАМИ У КОНТРОЛЬНИХ ТОЧКАХ

В даному розділі були розглянуті питання дослідження температурних розподілень у перерізі дерев'яних балок з використанням методу, заснованого на розв'язку рівняння теплопровідності. Для цього були застосовані граничні умови III роду, зміна температури оточуючого середовища за стандартною температурною кривою, теплофізичні характеристики деревини, коефіцієнт теплообміну, а також метод кінцевих різниць.

Розв'язок задачі теплопровідності проводився для визначення температурних розподілень в перерізі фрагменту зразка та розробки ефективного методу інтерполяції температурних полів.

Аналізуючи побудовані температурні розподіли можна помітити, що вогнезахисне просочення впливає на прогрівання. Це нашо вхує на думку, що обвуглена частина перерізу повинна бути обмежена ізотермою, яка відповідає критичній температурі, при якій відбувається перетворення деревини на вугілля. Критична температура визначається регресійними залежностями за отриманим апроксимаційним виразом для серединної горизонталі перерізу.

Після визначення критичних температур обвуглювання деревини були змодельовані зони обвуглювання для фрагментів балок із вогнезахисним просоченням і без нього. Ці дослідження були необхідні для визначення динаміки обвуглювання фрагментів балок з трьома вогнезахисними просоченнями та без вогнезахисту, підданих вогневим випробуванням за стандартним температурним режимом. Менша зона обвуглювання відповідає більшій межі вогнестійкості для дерев'яних балок.

## 4.1. Теоретичне дослідження температурних розподілень у перерізах дерев'яних балок

### 4.1.1. Математична модель теплопередачі у несучих елементах балок при їх вогневих випробуваннях

Для вивчення розподілень температури по перерізу несучих балок при вогневих випробуваннях була використана розрахункова методика, заснована на розв'язку рівняння теплопровідності, що має вигляд [53, 94 – 97]:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (4.1)$$

де  $T$  – температура, К;  $t$  – час, с;  $C_v(T)$  – питома об'ємна теплоємність, залежна від температури, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\lambda(T)$  – коефіцієнт теплопровідності, залежний від температури, Вт/(м·К).

Розглядався прямокутний переріз дерев'яної балки із тристороннім обігрівом, схема якого наведено на рис. 4.1.

Для розв'язку задачі (4.1) застосовуються граничні умови (ГУ) III роду:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_p - T_w), \quad (4.2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_p$ ,  $T_w$  – відповідно температури пожежного середовища і поверхні балки, К;  $r$  – поточна просторова координата.

Температура оточуючого простору визначається за стандартною температурною кривою пожежі за формулою:

$$T_p(t) = 345 \cdot \lg \left( \frac{2t}{15} + 1 \right) + T_0, \quad (4.3)$$

де  $T_0$  – початкова температура середовища, К;  $T_0 \approx 293$  К;  $T_p(t)$  – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій в залежності від часу  $t$  стандартного випробування.

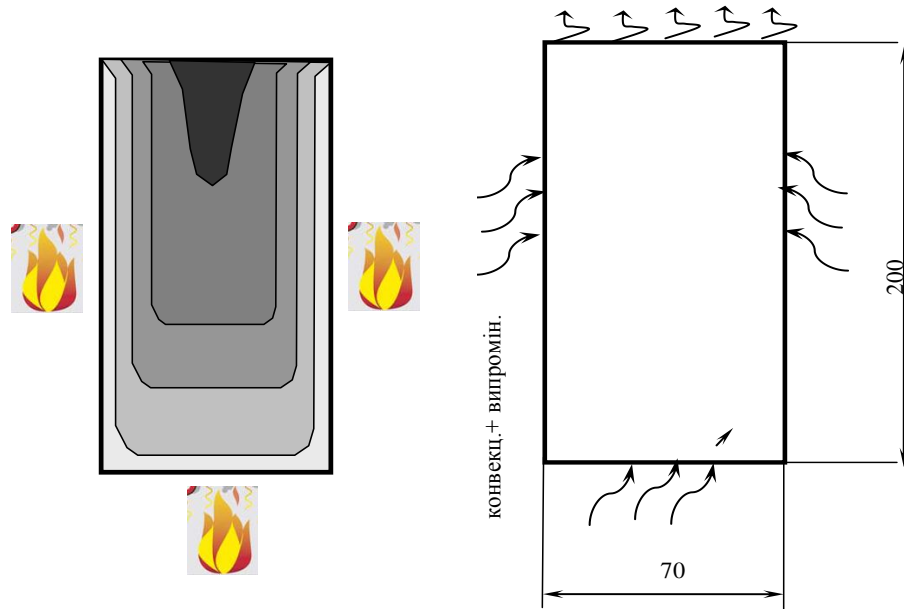


Рис. 4.1. Геометрія та граничні умови до теплового розрахунку дерев'яних балок

Коефіцієнт теплообміну враховує дію конвекції та інфрачервоного випромінювання і визначається за формулою:

$$\alpha = \alpha_B + \alpha_K, \quad (4.4)$$

де  $\alpha_B$  – коефіцієнт теплообміну випромінюванням;  $\alpha_K$  – коефіцієнт теплообміну конвекцією.

Згідно з рекомендаціями [53; 98 – 102], конвективну і радіаційну складові обігрівної сторони можна визначити з виразів:

$\alpha_K = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – поверхня, що обігрівається;

$$\alpha_B = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_W^4 - T_P^4}{T_W - T_P}, \quad (4.5)$$

де  $\varepsilon = 0,8$  – ступінь чорноти поверхні деревини;  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана.

На необігрівній поверхні балки вираз ГУ III роду записується у вигляді:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=h} = \alpha_n (293 - T_n), \quad (4.6)$$

де  $\alpha_n = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – коефіцієнти теплообміну необігрівної поверхні, що одночасно враховує його конвективну і радіаційну складові.

Початкова температура матеріалу балки та оточуючого середовища  $T_0 = 293 \text{ К}$ .

Теплофізичні характеристики деревини приймаються за рекомендаціями [53].

Коефіцієнт теплопровідності та питома теплоємність деревини є температурними залежностями, вигляд яких подано на рис. 4.2.

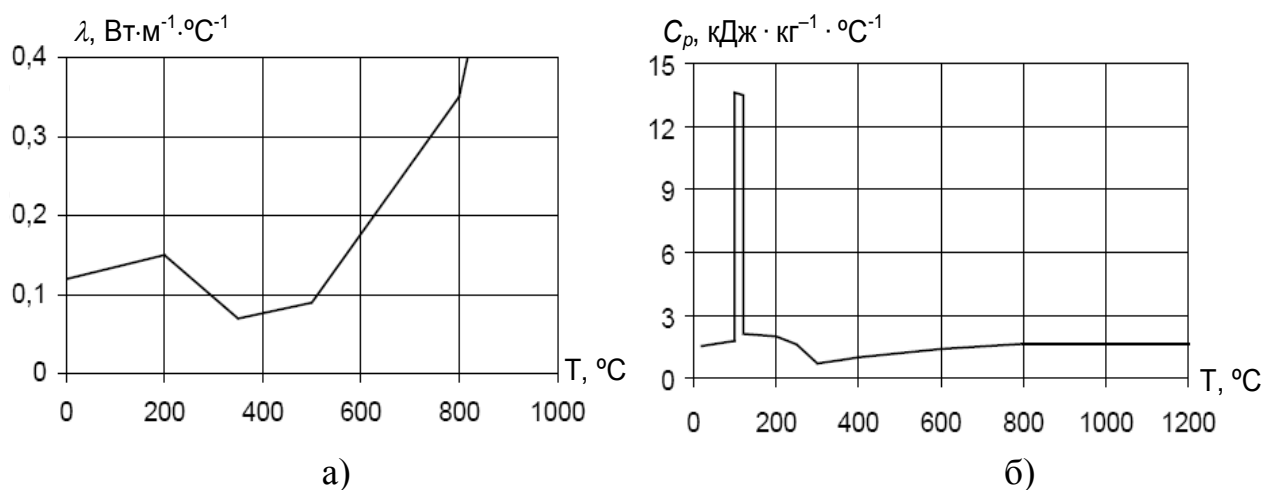


Рис. 4.2. Теплофізичні характеристики деревини: коефіцієнт теплопровідності (а); питома теплоємність (б)



Густина деревини при її нагріванні визначається за залежністю коефіцієнту її зниження від температури, що подана на рис. 4.3.

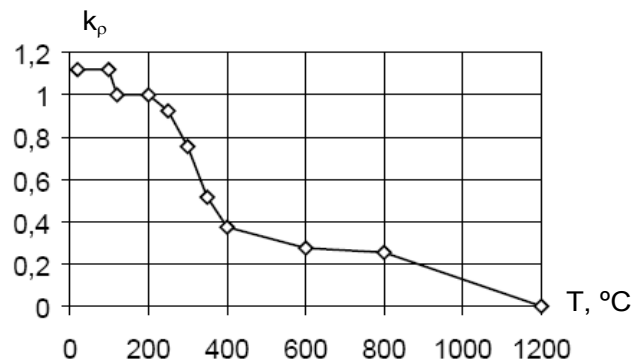


Рис. 4.3. Температурна залежність коефіцієнту зниження густини деревини від температури її нагрівання

Початкова густина деревини хвойних порід згідно з [53; 102 – 104] складає  $\rho_0 = 520 \text{ кг/м}^3$ .

#### 4.1.2. Чисельний метод інтегрування рівняння теплопровідності

Рівняння нестационарної теплопровідності (4.1) при даних теплофізичних характеристиках, граничних умовах та розрахунковій області не має аналітичного розв'язку. Для його розв'язання треба застосувати чисельні методи [105, 106]. Зручним для отримання температурних полів при даній математичній моделі теплопровідності є метод кінцевих різниць [106]. Для реалізації метода кінцевих різниць при розв'язку задачі теплопровідності (4.1) застосовується інтегро-інтерполяційний метод [107 – 110]. Даний метод дозволяє розглядати рівняння нестационарної теплопровідності у лінеаризованому вигляді.

Запис лівої частини рівняння теплопровідності (4.1) у кінцевих різницях має такий вигляд [110]:

$$A_{i,k} = C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = C_v \left( \frac{T_{i,k} + T_{i,k+1}}{2} \right) \cdot \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t}, \quad (4.7)$$

де  $A_{i,k}$  - об'ємна теплоємність;  $T_{i,k}$  - визначений номер вузлової точки кроку інтегрування по часу;  $\Delta t = 60$  с – часовий крок.

Часткові похідні у правій частині рівняння (4.1) з точністю  $O(h^2 + \Delta t)$  записуються у кінцевих різницях у вигляді виразів [110 – 113]:

$$\begin{aligned} B_{i,k} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = a_x T_{i-1,k}^x - (a_x + b_x) T_{i,k}^x + b_x T_{i+1,k}^x, \\ C_{i,k} &= \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = a_y T_{i-1,k}^y - (a_y + b_y) T_{i,k}^y + b_y T_{i+1,k}^y, \end{aligned} \quad (4.8)$$

де  $B_{i,k}$  - об'ємна теплопровідність;  $C_{i,k}$  - об'ємне значення зменшення густини.

Коефіцієнти рівняння (4.1), залежні від коефіцієнта теплопровідності, визначаються з використанням інтегро-інтерполяційного методу [106 – 109, 114] за такими виразами:

$$\frac{1}{a} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i-1}) + \lambda(T_i))h^2}{\lambda(T_{i-1})\lambda(T_i)}, \quad \frac{1}{b} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i+1}) + \lambda(T_i))h^2}{\lambda(T_{i+1})\lambda(T_i)}. \quad (4.9)$$

Вирази (4.7) – (4.9) дозволяють здійснити апроксимацію рівняння теплопровідності за допомогою кінцевих різниць. При цьому записане рівняння застосовується у вигляді рекурентних формул у вузлових точках розрахункової області на  $k+1$ -ому часовому кроці за попередньо визначеними температурами  $k$ -ого часового кроку. Рекурентні формули записується в неявному вигляді і розв'язуються як нелінійні рівняння.

Рівняння, отримані за методом кінцевих різниць, записуються у

вигляді:

$$A_{i,k} = B_{i,k} + C_{i,k}. \quad (4.10)$$

Розв'язок отриманих нелінійних рівнянь виконується за методом половинного ділення за алгоритмом, наведеним в [114] при регуляризації обмежень можливих рішень за множиною допустимих температур прогріву дерев'яних балок.

Граничні умови III роду у кінцевих різницях записуються у вигляді [115 – 117]:

$$\frac{\lambda(T_{w_k})\lambda(T_{1,k})}{\lambda(T_{w_k}) + \lambda(T_{1,k})} \cdot \frac{T_{w_k} - T_{1,k}}{h} + \frac{h \cdot C_v(T_{1,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (T_{1,k} - T_{1,k-1}) = \alpha_k (T_{1,k} - T_{p,k}), \quad (4.11)$$

де  $T_p$  – температура пожежі, що відповідає стандартному температурному режиму і визначається за формулою стандартного температурного режиму пожежі (4.3);  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, який визначається за формулами (4.4) – (4.6);  $h = 0.01$  м – крок розбиття перерізу;  $\Delta t = 60$  с – часовий крок.

Часовий і просторовий кроки вибираються за умовою збіжності вибраної кінцево-різницевої схеми. Також часовий крок за можливістю вибирається рівним 1 хв., відповідно до контрольного проміжку часу при проведенні вогневих випробувань.

Для реалізації методу кінцевих різниць була складена кінцево-різницева схема, яка складається з пронумерованої сітки для відтворення крайової задачі, що наведена на рис. 4.4.

22	23	24	25	26	27	28	1
48	168	167	166	165	164	163	3
47	162	161	160	159	158	157	4
46	156	155	154	153	152	151	5
45	150	149	148	147	146	145	6
44	144	143	142	141	140	139	7
43	138	137	136	135	134	133	8
42	132	131	130	129	128	127	9
41	126	125	124	123	122	121	10
40	120	119	118	117	116	115	11
39	114	113	112	111	110	109	12
38	108	107	106	105	104	103	13
37	102	101	100	99	98	97	14
36	96	95	94	93	92	91	15
35	90	89	88	87	86	85	16
34	84	83	82	81	80	79	17
33	78	77	76	75	74	73	18
32	72	71	70	69	68	67	19
31	66	65	64	63	62	61	20
30	60	59	58	57	56	55	21
29	54	53	52	51	50	49	22

Рис. 4.4. Кінцево-різницева схема досліджуваної дерев'яної балки

#### 4.1.3. Результати розв'язку задачі теплопровідності для перерізу фрагменту дерев'яної балки

Після розв'язку задачі теплопровідності були отримані температурні розподіли, які показані на рис. 4.5.

Таким чином, були визначені температурні розподіли у перерізі фрагменту дерев'яної балки, що був підданий випробуванню з використанням рекомендацій [53], які містять відповідний стандарт щодо розрахункових методів оцінки вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій.

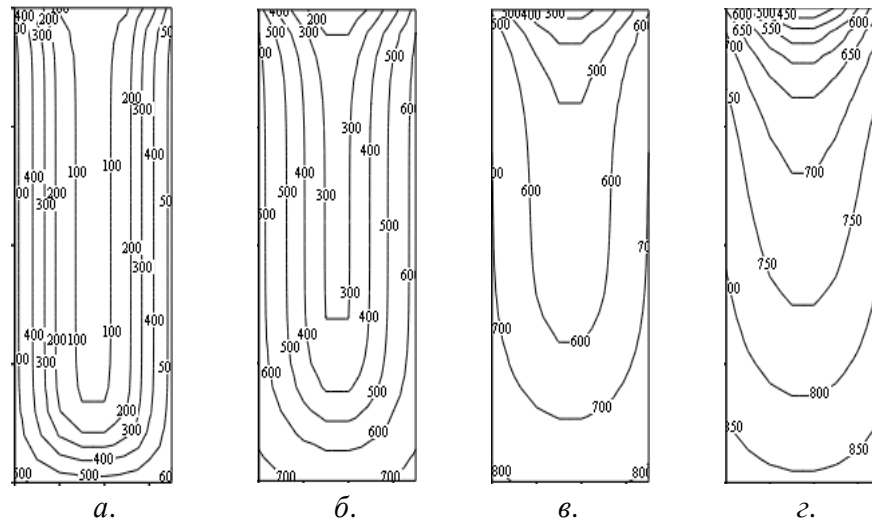


Рис. 4.5. Температурні розподіли у перерізі фрагменту дерев'яної балки та відповідні шкали у моменти часу: а – 15 хв.; б – 30 хв.; в – 45 хв.; г – 60 хв.

#### 4.2. Метод інтерполяції температурних полів у перерізі фрагменту дерев'яної балки за результатами вимірювань температури під час їх випробувань

##### 4.2.1. Інтерполяція температурних розподілів вздовж ліній перерізу

Для апроксимації температурних розподілів вздовж ліній перерізу будівельних конструкцій при дії на них пожежі із стандартним температурним режимом зручно застосовувати номограмний метод [118]. При цьому температурні розподіли представляються подібними кривими, що описуються функціоналами, де відрізняються тільки їх відповідні параметри. Аналізуючи криві, подані на рис. 4.5, можна припустити, що вони можуть бути апроксимовані за таким схемою, що наведена на рис. 4.6 [118].

Для апроксимації застосуємо алгоритм, заснований на представленні температурних кривих узагальненим виразом:

$$T_{k,i} = T_{0k} + (T_{\max k} - T_{0k}) \left[ \frac{i}{n} \right]^{Q_k}, \quad (4.14)$$

де  $T_{k,i}$  – температура  $i$ -тої точки даної лінії перерізу у  $k$ -тий момент часу;  
 $T_{0k}$ ,  $T_{\max k}$  – температура першої та останньої точок даної лінії перерізу у  $k$ -  
 тий момент часу;  $n$  – кількість інтервалів між контрольними точками;  $Q_k$  –  
 показник ступеня параболи у  $k$ -тий момент часу, що визначається за  
 алгоритмом, поданим на рис. 4.7.[119].

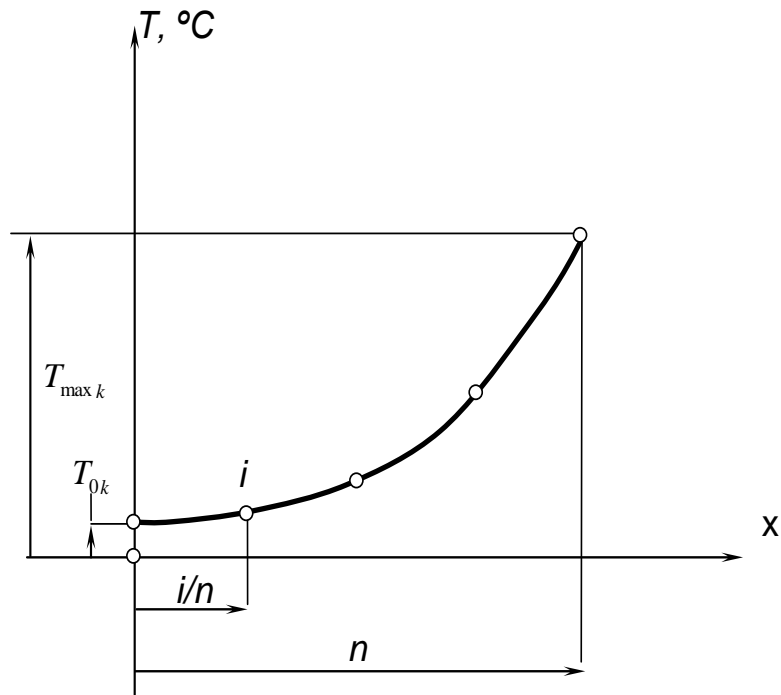


Рис. 4.6. Схема апроксимації температурних розподілів балки під час випробувань на вогнестійкість

На рис. 4.8 показані результати розрахунку за результатами отриманими у ході розв'язку задачі теплопровідності, та результати, отримані із застосуванням виразів (4.14). На даних температурних розподілах також показана похибка вимірювань, що визначена з огляду на похибку температурних датчиків та похибку їх розташування у перерізі при проведенні експерименту, яка складає  $38\text{ }^\circ\text{C}$ .

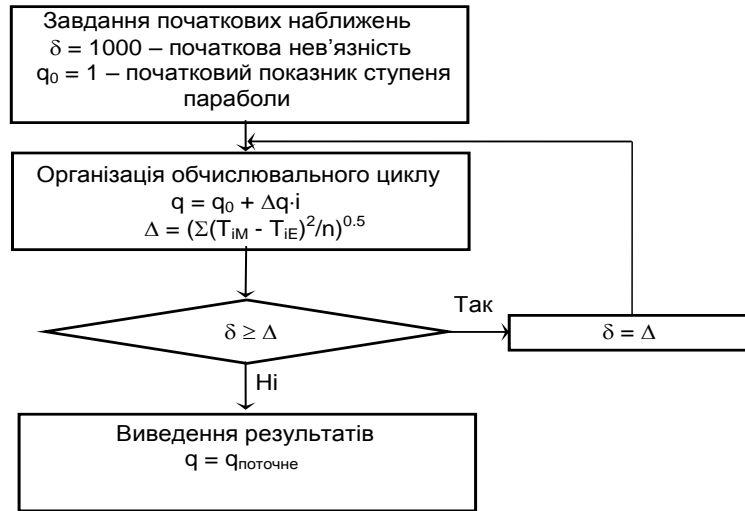


Рис. 4.7. Блок-схема алгоритму визначення апроксимуючого поліному

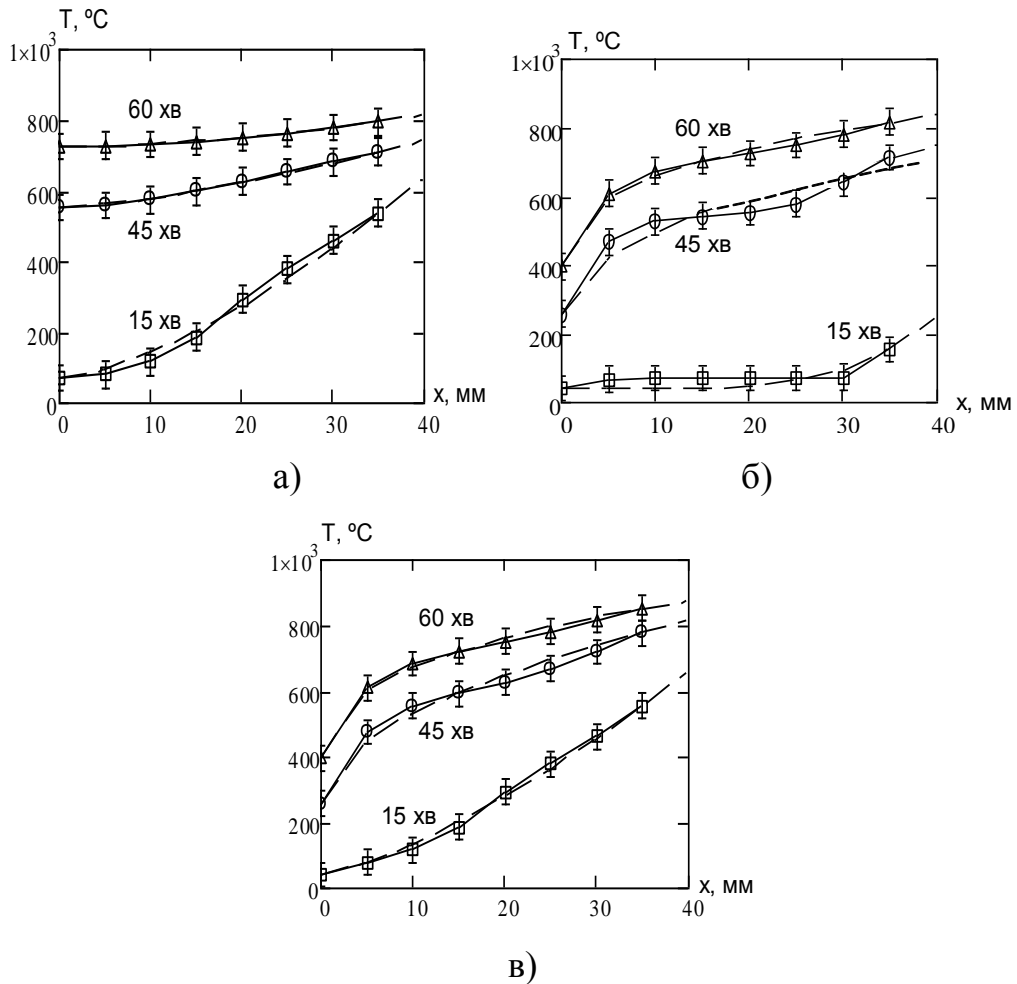


Рис. 4.8. Температурні розподіли по лініям перерізу фрагменту дерев'яної балки у різні моменти часу: а – середній горизонталі; б – середній вертикалі; в – головній діагоналі симетричної половини перерізу

З графіків рис. 4.8 видно, що майже у всіх випадках відхилення температурних розподілень, отриманих за виразом (4.14) шляхом інтерполяції, від вихідних температурних розподілень не перевищують експериментальної похибки. Це означає що отримані температурні розподіли по лініям перерізу можна використовувати для інтерполяції температурного поля у проміжних вузлових точках перерізу фрагменту дерев'яної балки.

#### **4.2.2. Інтерполяція температурних розподілів у перерізі фрагментів дерев'яних балок**

Для інтерполяції температурних полів у проміжних вузлових точках перерізу фрагментів дерев'яних балок, що вивчаються, використовується метод, який описаний у роботі [118]. Даний метод заснований на наближенні ізотерм спеціальним кривими.

Застосовуючи такий підхід, був запропонований вираз, що має такий вигляд:

$$y(x) = y_0 \left( 1 - \left( \frac{x}{x_0} \right)^p \right)^{1/p}, \quad (4.15)$$

де  $x_0$  і  $y_0$  – координати на вісі  $x$  та  $y$  при їх перетинанні апроксимуючою кривою;  $p$  – показник ступеня апроксимуючої кривої, що підлягає визначенню при наближенні ізотерм.

На рис. 4.9 показаний вигляд сімейства кривих, побудованих за виразом (4.15).

Вираз (4.15) описує криву еліптичного типу із ступенем, що відрізняється від 2 (див. рис. 4.11).



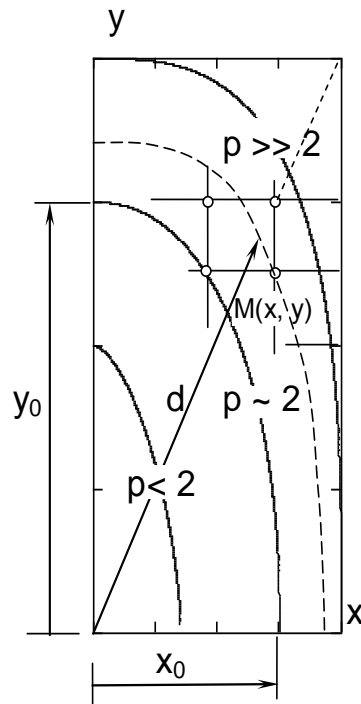


Рис. 4.9. Схема апроксимації ізотерм в перерізі фрагмента дерев'яної балки

У параметризованому вигляді вираз (4.15) можна записати як рівняння:

$$y^p x_0^p + x^p y_0^p - x_0^p y_0^p = 0. \quad (4.16)$$

У даному рівнянні кожний член залежний від параметру  $d$ , що визначає відстань, яку відсікає апроксимуюча крива на головній діагоналі перерізу.

Члени рівняння визначалися за формулами:

$$y_0 = \left[ (T_{dk} - T_0)(T_{vk} - T_0)^{-1} d^{Q_d} \right]^{Q_v^{-1}}; \quad x_0 = \left[ (T_{dk} - T_0)(T_{gk} - T_0)^{-1} d^{Q_d} \right]^{Q_g^{-1}}, \quad (4.17)$$

$$x = d \cdot a(a^2 + h^2); \quad y = d \cdot h(a^2 + h^2), \quad (4.18)$$

де  $T_{dk}$ ,  $T_{gk}$ ,  $T_{vk}$  – температури, що визначені на обігрівних поверхнях відповідно на діагоналі та середніх вертикалі та горизонталі перерізу;  $T_0$  –

температура найменш нагрітої точки перерізу;  $Q_d$ ,  $Q_g$ ,  $Q_v$  – показники ступеня виразу (4.14), які визначені відповідно для діагоналі та середніх горизонталі та вертикалі перерізу.

Змінюючи параметр  $d$ , були визначені залежності показника ступеня рівняння (4.16) для кожної хвилини упродовж дії стандартної пожежі протягом 60 хв. Рівняння (4.16) розв’язувалося методом ітерацій згідно алгоритму [118]. На рис. 4.10 наведено графіки залежності показника ступеню від параметру  $d$  для різних моментів часу дії пожежі.

Знаючи показник ступеня виразу (4.15), легко побудувати температурні розподіли для дерев’яної балки. Використовуючи такий підхід і виміри температури в контрольних точках перерізу при проведенні випробувань, була проведена інтерполяція температурних розподілів. Результати розрахунку подані на рис. 4.11.

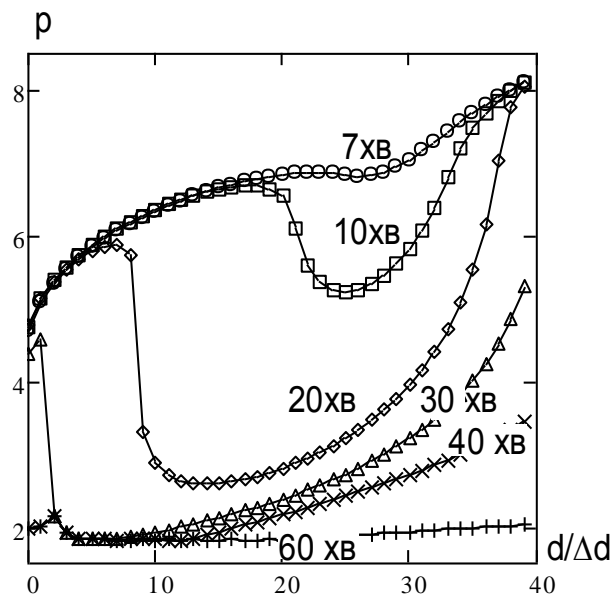


Рис. 4.10. Залежності показника ступеня рівняння від параметру  $d$  для різних моментів часу дії пожежі

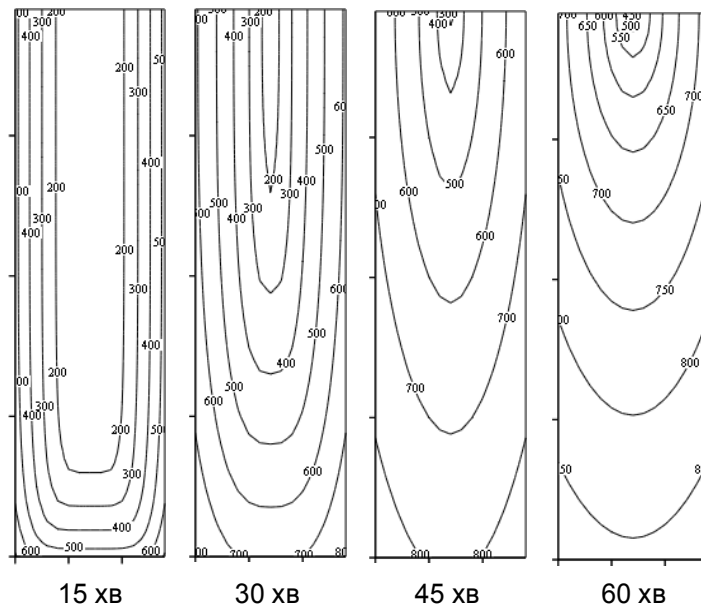


Рис 4.11. Температурні розподіли в перерізі фрагмента дерев'яної балки без просочення

#### 4.3. Інтерполяція температур у перерізах фрагментів дерев'яних балок підданих випробуванням

Для проведення інтерполяції використані температурні залежності, що подані на рис. 3.3. За даними залежностями можна визначити криві розподілів температури вздовж серединної вертикалі перерізу балки. Крім цього, для проведення інтерполяції були використані залежності показника ступеня виразу (4.15) від відсіченого відрізка діагоналі симетричної половини перерізу балки. Для проведення інтерполяції також були побудовані залежності коефіцієнту співвідношення  $k_{xy} = \frac{x_0}{y_0}$  координат перетину апроксимаційною кривою осей координат. На рис. 4.12 наведено графіки для деяких моментів часу.

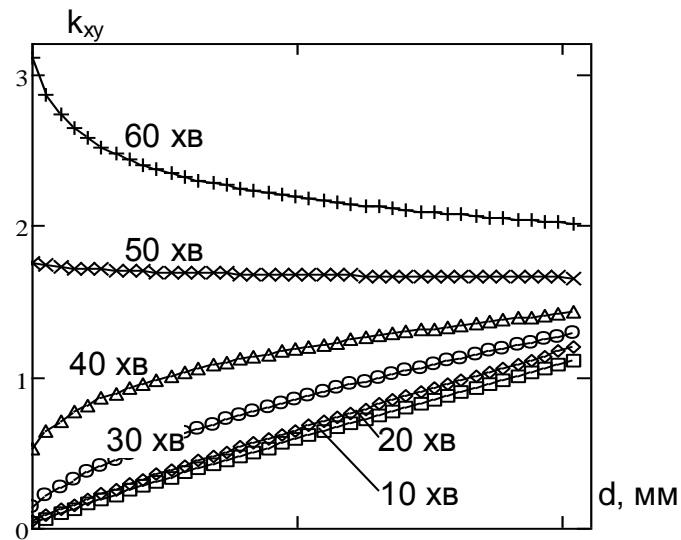


Рис. 4.12. Залежності коефіцієнта співвідношення початкових координат від параметру  $d$  для різних моментів часу дії пожежі

Знаючи перелічені дані, можна побудувати криві, що є наближенням ізоTERM у перерізах випробуваних зразків. На рис. 4.13 – рис. 4.16 показані отримані температурні розподіли у різні моменти часу випробування.

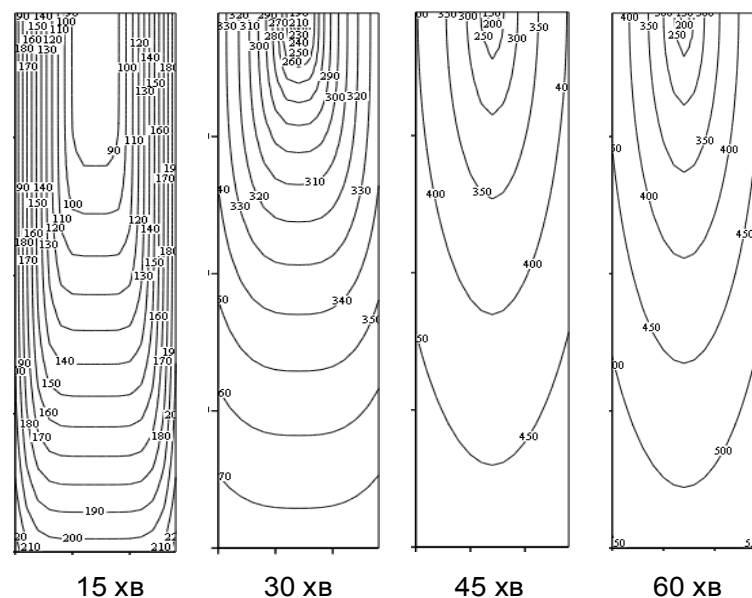


Рис. 4.13. Температурні розподіли у перерізі зразку-фрагменту дерев'яної балки без просочення

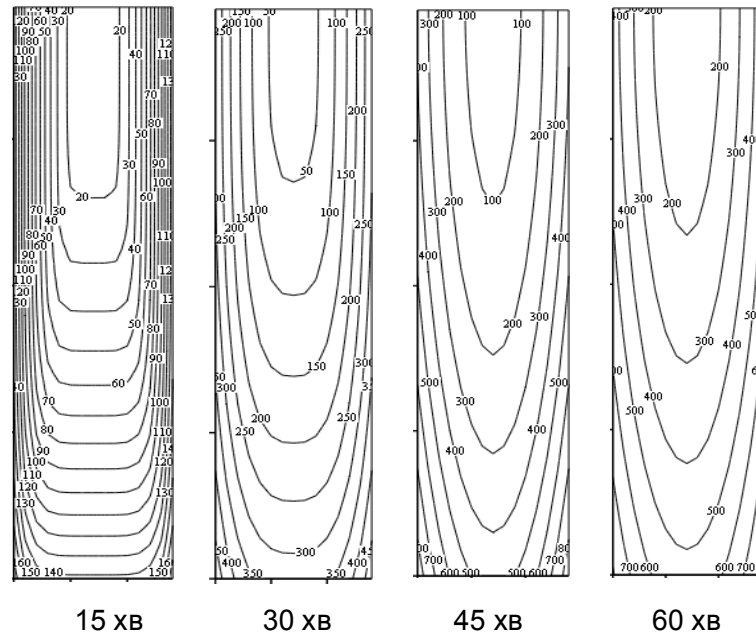


Рис. 4.14. Температурні розподіли у перерізі зразку-фрагменту дерев'яної балки з вогнезахисним просоченням I типу

Аналізуючи побудовані температурні розподіли, можна помітити, що вогнезахисне просочення суттєво впливає на нього.

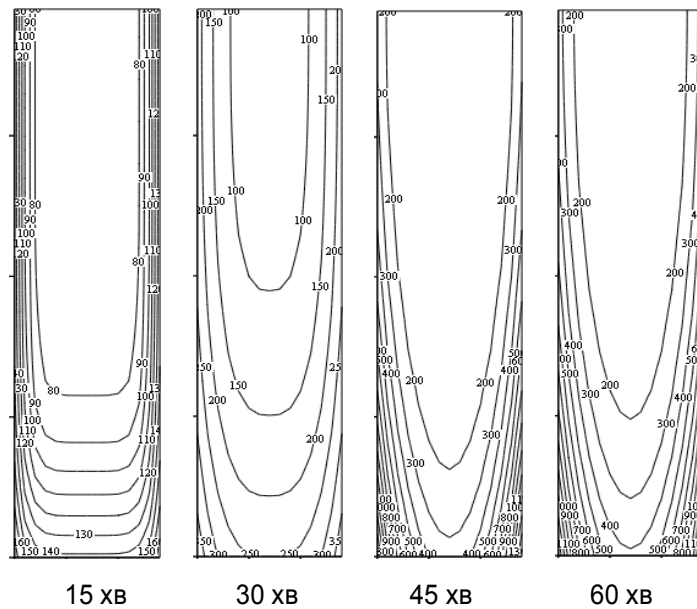


Рис. 4.15. Температурні розподіли у перерізі зразку-фрагменту дерев'яної балки з вогнезахисним просоченням II типу

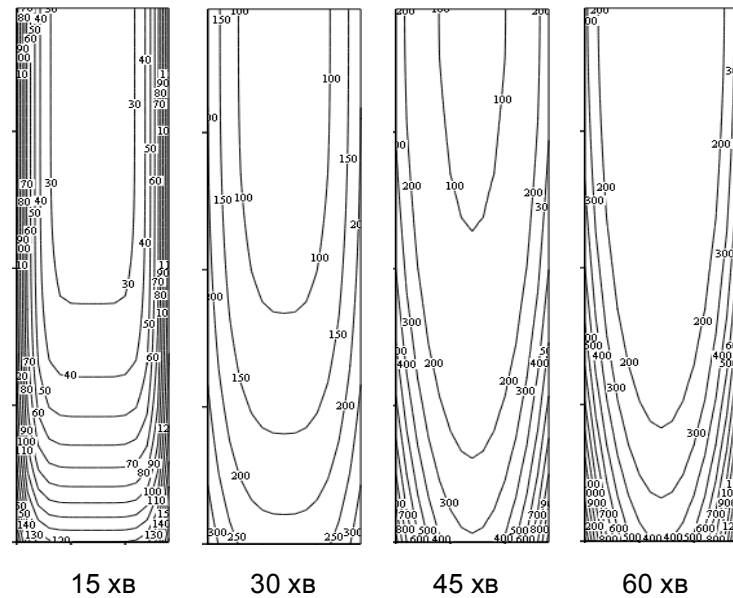


Рис. 4.16. Температурні розподіли у перерізі зразку-фрагменту дерев'яної балки з вогнезахисним просоченням III типу

Переріз зразку без вогнезахисту набагато швидше прогривається. Це пояснюється тим, що просочений шар не тільки опирається горінню, а й зменшує теплопровідність за рахунок ущільнення поверхневого шару. Найменше піддаються прогріванню внутрішні шари перерізу зразку-фрагменту дерев'яної балки із вогнезахисними просоченнями II та III типу.

#### 4.4. Моделювання процесу обуглювання вогнезахисних дерев'яних балок на основі результатів вогневих випробувань їх фрагментів

При моделюванні обуглювання дерев'яних балок нами за основу взято припущення про те, що обуглена частина перерізу повинна залежати від його прогрівання. Якщо це виконується, тоді зона обуглювання повинна бути обмежена відповідною ізотермою, що відповідає критичній температурі, при якій відбувається 80% – 90% перетворення деревина на вугілля.

Використовуючи регресійні залежності, що визначені у табл. 3.3-табл.

3.4, можна визначити критичну температуру обуглювання за формулою

$$T_{кр,i} = T_{0i} + (T_{gi} - T_{0i}) \left[ \frac{0,5a - d_i}{a} \right]^{Q_{gi}}. \quad (4.19)$$

На рис. 4.17 наведено графіки залежності критичної температури від часу випробування з огляду на створені моделі швидкості обуглювання вогнезахисної і не вогнезахисної деревини фрагментів дерев'яних балок, підданих випробуванням.

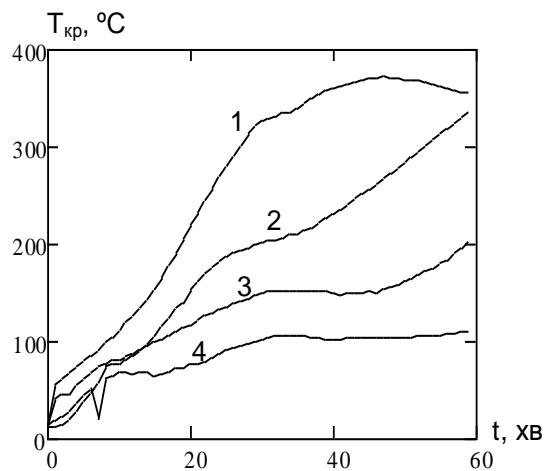


Рис. 4.17. Залежності критичної температури обуглювання від часу випробування: 1 – без вогнезахисту; 2 – вогнезахисне просочення I типу; 3 – вогнезахисне просочення II типу; 4 – вогнезахисне просочення III типу

Після визначення критичних температур обуглювання деревини були змодельовані зони обуглювання для фрагментів балок, підданих випробуванням, із вогнезахисними просоченнями і без них.

На рис. 4.18 – рис. 4.21 показана динаміка зміни обугленої зони фрагментів дерев'яних балок, підданих випробуванням, що визначена за результатами моделювання.

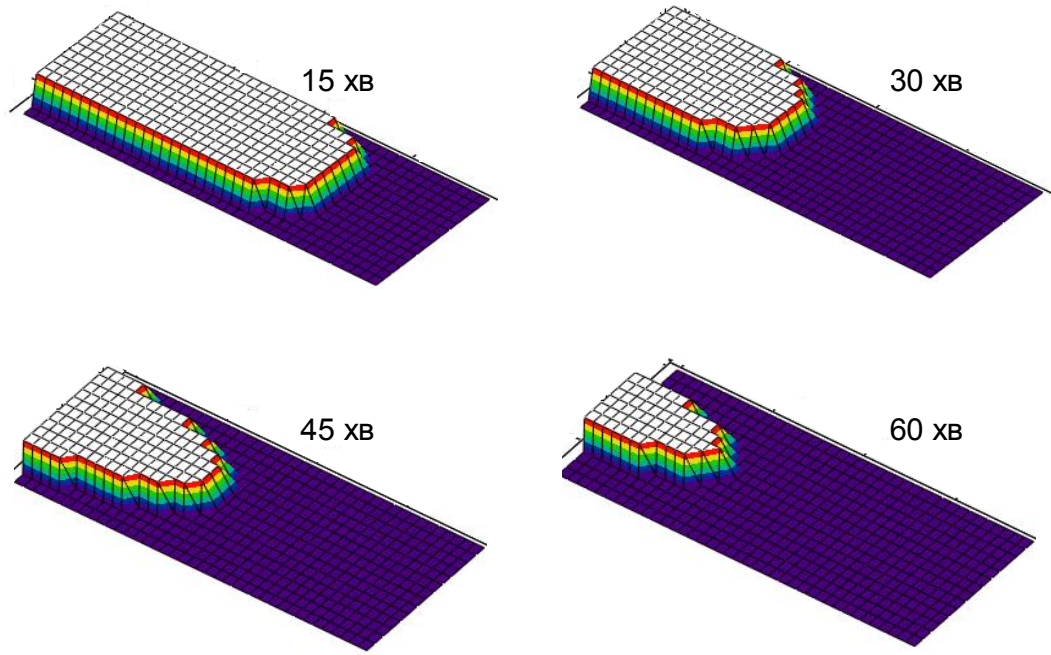


Рис. 4.18. Динаміка зміни обвугленої зони фрагменту без вогнезахисного просочення

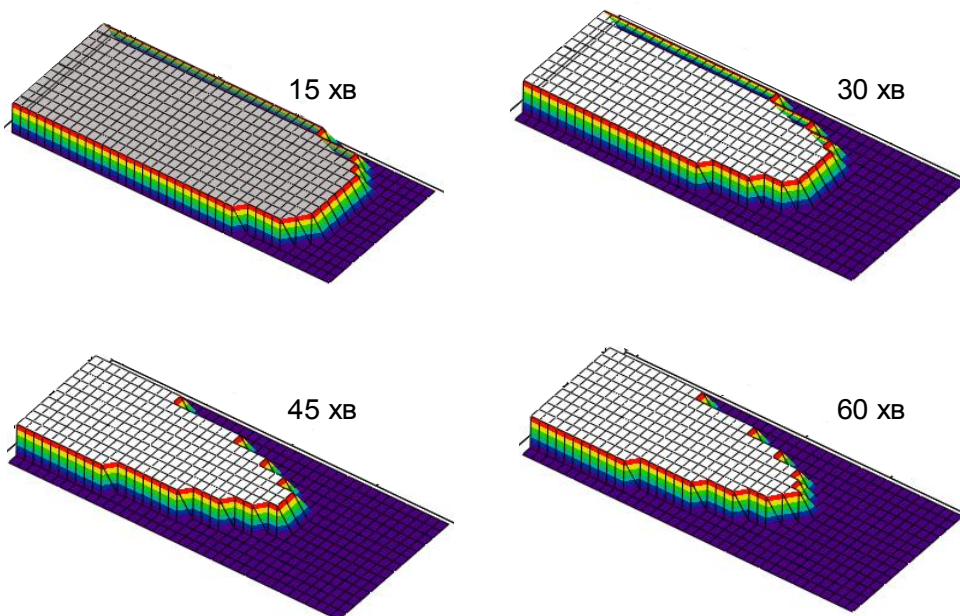


Рис. 4.19. Динаміка зміни обвугленої зони фрагменту із вогнезахисним просоченням I типу



Рис. 4.19 – рис. 4.21 відповідають реальному розміру фрагмента зразка дерев'яної балки підданої вогневим випробуванням за стандартним температурним режимом.

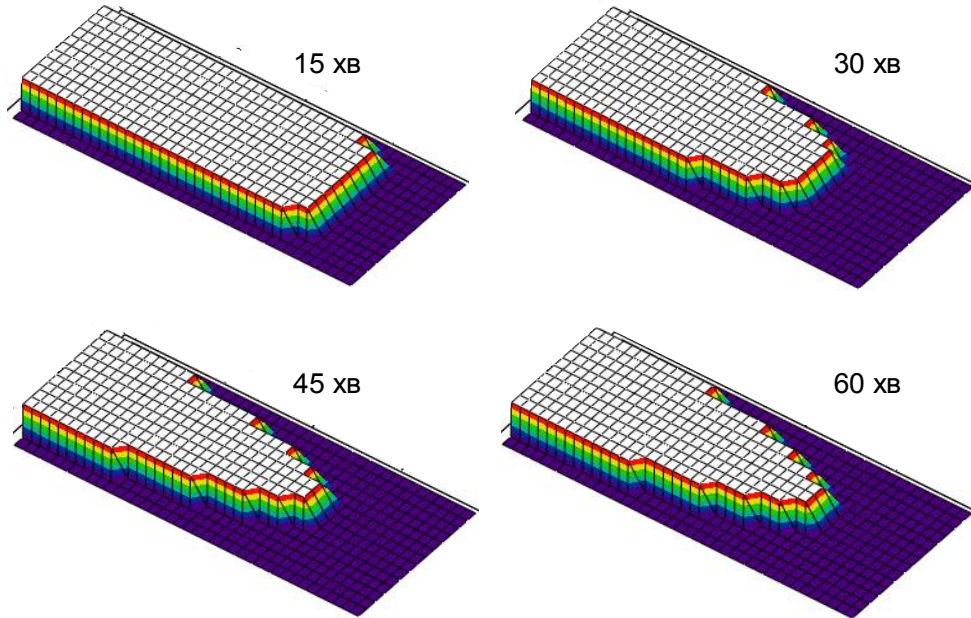


Рис. 4.20. Динаміка зміни обвугленої зони фрагменту із вогнезахисним просоченням II типу

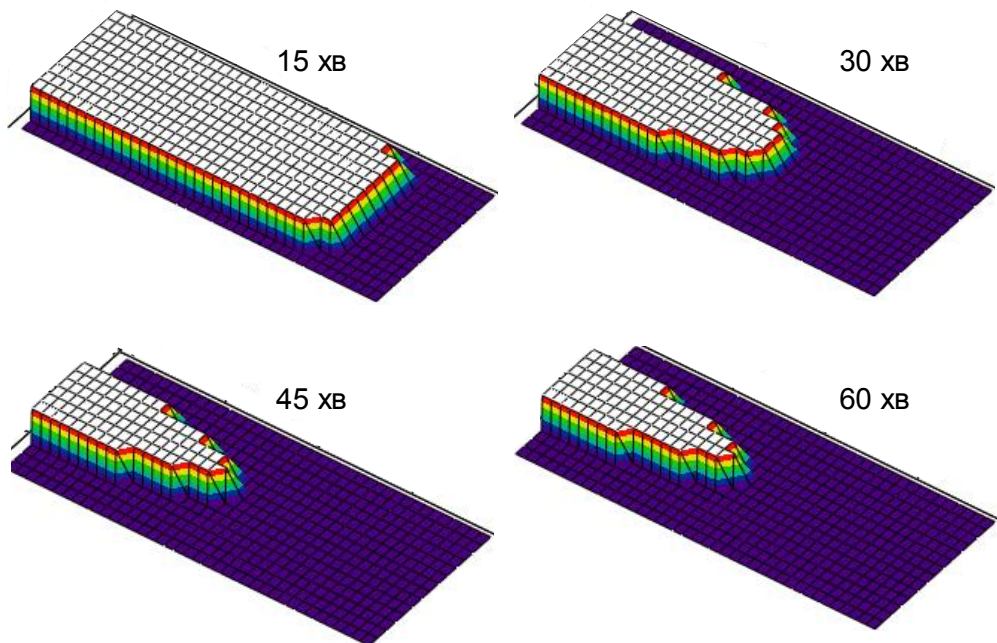


Рис. 4.21. Динаміка зміни обвугленої зони фрагменту із вогнезахисним просоченням III типу.

Вивчення динаміки обвуглювання фрагментів дерев'яних балок показує, що всі три типи на початку вогневої дії пожежі однаково опираються поширенню зони обвуглювання, і цей опір помітно більший за опір фрагменту без вогнезахисного просочення. Зважаючи на призначення таких просочень, це очікуваний результат. На певному етапі швидкість поширення обвугленої зони III типу просочення стає набагато більшою за інші два типи. І швидкість обвуглювання у фрагменті із III типом просочення стає близькою до швидкості обвуглювання не просоченого фрагменту. Це може бути пояснено тим, що при згорянні просоченого шару у обвугленій зоні фрагментів із I та II типом просочення залишаються речовини, що перешкоджають подальшому обвугленню, чого не можна сказати про вогнезахисне просочення III типу. На це також вказують графіки критичної температури нагріву на рис. 4.18.

Аналіз рис. 4.19 – рис. 4.21 показує, що найбільшу вогнезахисну здатність мають вогнезахисні просочення I та II типів, оскільки при їх застосуванні зона обвуглювання є істотно меншою за III тип. Менша зона обвуглювання відповідає більшій межі вогнестійкості дерев'яних балок.

#### **4.5. Висновки**

1. У даному розділі був розроблений метод інтерполяції температурних полів у перерізі фрагментів дерев'яних балок, підданих вогневим випробуванням. Із застосуванням цього метода визначені розподіли температури у перерізі фрагментів дерев'яних балок із врахуванням температурних вимірювань, що виконані під час проведення випробувань.

2. На основі експериментальних досліджень поведінки дерев'яних балок із вогнезахисними просочуваннями в умовах вогневого впливу пожежі із стандартним температурним режимом визначені розподіли температури у перерізі фрагментів дерев'яних балок. Їхнє значення для теоретичних розрахунків має максимальну температуру для 15 хв. – 500 °С, 30 хв. – 700

°C, 45 хв. – 800 °C та 60 хв. – 850 °C. В порівнянні для зразків без вогнезахисного просочення: 15 хв. – 600 °C, 30 хв. – 700 °C, 45 хв. – 800 °C та 60 хв. – 850 °C, що свідчить про достовірність отриманих розрахункових значень.

3.3 огляду на отримані закономірності швидкості обвуглювання деревини фрагментів із вогнезахистом і без нього були визначені критичні температури обвуглювання для кожного моменту часу вогневого випробування.

4. На основі отриманих залежностей були визначені зони обвуглювання фрагментів дерев'яних балок, підданих випробуванням. Найбільшою вогнезахисною здатністю володіють вогнезахисні просочення I та II типів, оскільки при їх застосуванні зона обвуглювання є істотно меншою за III тип. Відповідно менша зона обвуглювання передбачає більшу межу вогнестійкості для дерев'яних балок.

5. Запропонована модель для визначення критичної температури, за якою відбувається обвуглювання, і яка дозволяє визначити конфігурацію зони обвуглювання у вигляді зони, обмеженої відповідною ізотермою.

6. На основі порівнянь результатів інтерполяції температурних полів із результатами, отриманими на основі розв'язку задачі теплопровідності, показано, що вони узгоджені між собою.

7. Розвинено математичний апарат інтерполяції температурних полів за вимірюваннями температури у контрольних точках, заснований на представленні інтерполяційної функції у вигляді параболічної залежності із ступенем, показник якого залежить від часу експонування дерев'яних балок при вогневій дії в умовах випробувань на вогнестійкість.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСТОМ

В даному розділі висвітлено опис розрахункового методу оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з використанням методу розв'язання міцнісної задачі, що полягає у збільшенні кривизни нейтральної лінії балки у кожний момент часу випробувань із одночасним визначенням згинального моменту на кожному кроці збільшення прогину. Метод розв'язку міцнісної задачі визначається за допомогою зв'язку між напруженнями та деформацією визначеної зони з застосуванням діаграми «напруження – деформації» типу Прандлі. Для їх побудови необхідно знати залежність міцності деревини та її модуля пружності від температури, а також визначення максимального моменту, що може витримати балка в даний момент її нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі. Цей метод було застосовано для п'яти випадків – теоретичного розподілу температур у балці, розподілу температур у балці, що визначений запропонованим способом для балок без просочування та балок із трьома типами вогнезахисного просочення для визначення реальної межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням без урахування зони обвуглювання та з її урахуванням.

Також в розділі було проведено перевірку запропонованого методу для балок інших перерізів, визначено їхню межу вогнестійкості.

#### **5.1. Метод розв'язку міцнісної задачі щодо визначення межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахистом**

Серед методів визначення межі вогнестійкості шляхом розв'язку міцнісної задачі можна виділити спрощені методи, що наведені у [52; 120, 121], та уточнені методи, описані у [52; 122 – 124]. Для розрахунку межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахистом використаний підхід [52],

що полягає у поступовому збільшенні кривизни нейтральної лінії балки у кожний контрольний момент часу випробування із одночасним визначенням згинального моменту на кожному кроці збільшення прогину. При досягненні критичного значення прогину, що визначається за формулою [52]

$$D = \frac{L^2}{400 \cdot b}, \quad (5.1)$$

де  $L$  та  $b$  – довжина прольоту та висота перерізу балки відповідно, розрахунок припиняється.

Із отриманих значень моменту вибирається найбільше значення  $M_{Rd,fi}$ , яке і буде вважатися несучою здатністю досліджуваної балки.

При цьому балка розглядається як шарнірно оперта і відповідає розрахунковій схемі, що наведена на рис. 5.1.

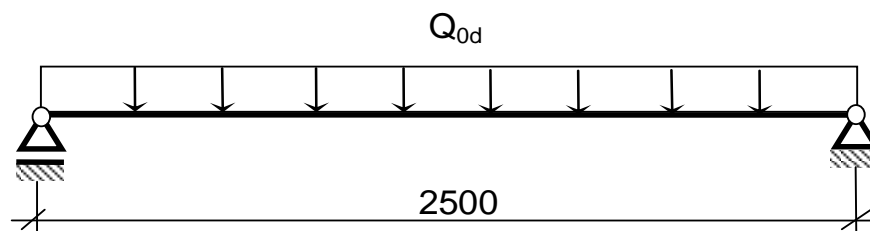


Рис. 5.1. Розрахункова схема дерев'яної балки для міцнісного розрахунку

Момент у небезпечному перерізі балки визначається шляхом розбиття перерізу на ділянки прямокутної форми. При цьому вважається, що в кожній ділянці розташований стрижень, у якому зв'язок між силовим фактором і деформацією відповідає визначеній діаграмі деформування. Принцип роботи перерізу відповідає розрахунковій схемі, наведеній на рис. 5.2.

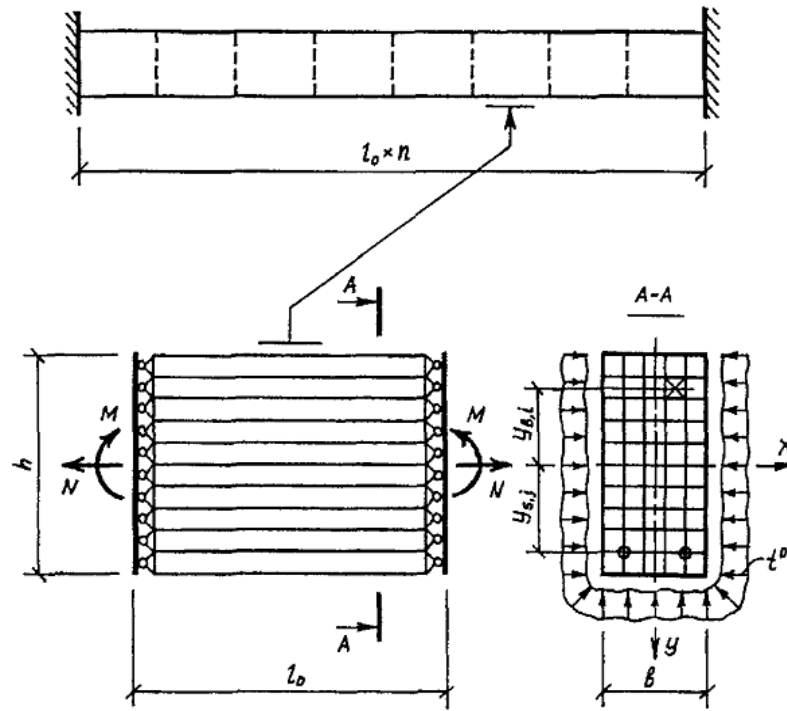


Рис. 5.2. Схема роботи перерізу дерев'яної балки в умовах пожежі для розв'язку міцнісної задачі за методом збільшення деформації

Момент у перерізі балки у поточний момент часу згідно з застосованим підходом визначається за формулою

$$M_{d,fi} = \sum_i \sum_j \sigma_{i,j} A_w Y_{i,j}, \quad (5.2)$$

де  $\sigma_{i,j}$  – напруження у зоні, на які розбитий переріз;  $A_w$  – площа зони, на які розбитий переріз;  $Y_{i,j}$  – координата зони, на які розбитий переріз, у напрямку вертикальної вісі відносно центру тяжіння перерізу із відкинутою обвугленою зоною.

Центр тяжіння перерізу після відкидання обвугленої зони у поточний момент часу визначається за формулою

$$Y_c = n^{-1} \sum_i \sum_j y_{i,j}, \quad (5.3)$$

де  $y_{i,j}$  – координата центру поточної зони, на які розбитий переріз;  $n$  – кількість зон, на які розбитий переріз.

Для проведення обчислень за формулою (5.3) використана розрахункова схема, що подана на рис. 5.3.

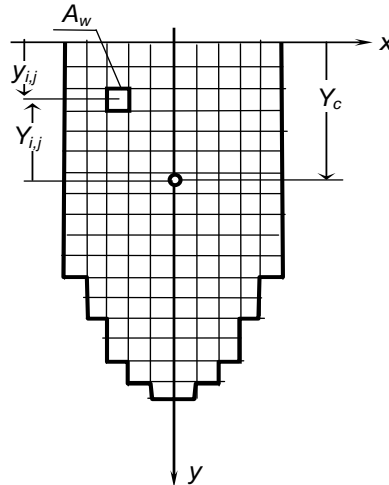


Рис. 5.3. Схема визначення координати центру тяжіння перерізу балки без обвугленої зони

Момент, що діє у небезпечному перерізі балки при впливі на неї пожежі, визначається за формулою [125, 126]

$$M_{Ed,fi} = 0.125 Q_{0d} l_z^2. \quad (5.4)$$

### 5.1.1. Термомеханічні властивості деревини

Для розв'язку міцнісної задачі запропонованим методом напруження визначаються за допомогою зв'язку між напруженнями та деформацією визначеної зони, на які розбитий переріз балки (див. рис. 5.3). В цьому випадку застосовуються діаграми «напруження – деформація» типу діаграм Прандтля [127].

Для побудування таких діаграм необхідно знати залежність міцності деревини та її модуля пружності від температури. Для встановлення таких

залежностей використано рекомендації [120; 127]. Згідно із цими рекомендаціями, вигляд даних залежностей має бути таким, як показано на рис. 5.4.

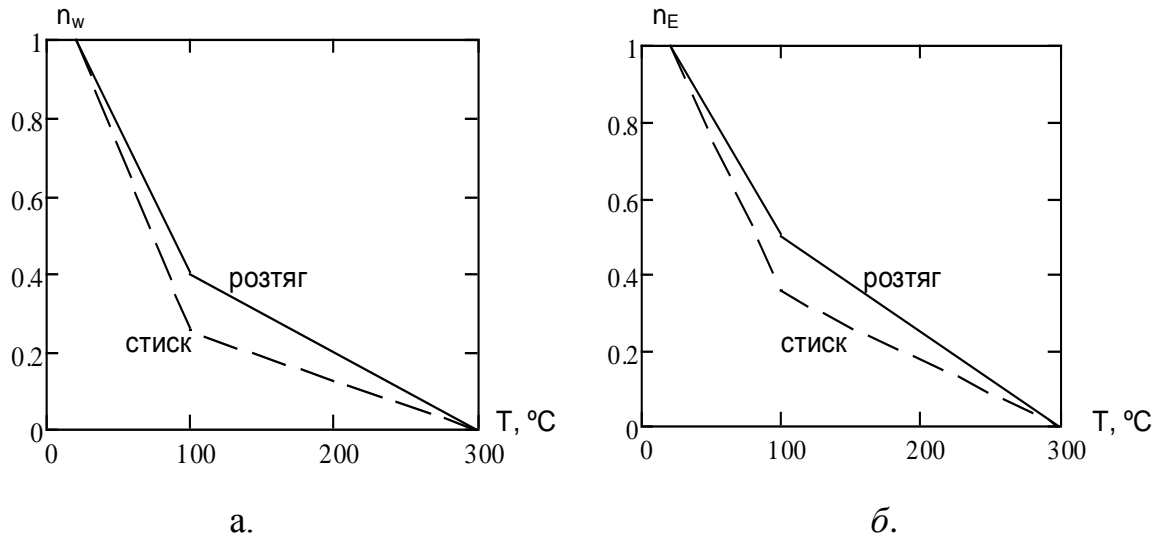


Рис. 5.4. Коефіцієнти зниження міцності (а) та модуля пружності (б) деревини паралельно до її волокон (сосна)

Для побудування діаграм деформування взяті середня міцність і середнє значення модуля пружності. Ці значення та параметри діаграм, наведених на рис. 5.4, зведені до абл. 5.1.

Таблиця 5.1

Параметри для побудови діаграм деформування деревини за умов її нагрівання до повної деструкції

Температура нагріву, $T, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт зниження міцності на стиск, $n_{wc}$	Коефіцієнт зниження міцності на розтяг, $n_{wt}$	Коефіцієнт зниження модуля пружності на стиск, $n_{Ec}$	Коефіцієнт зниження модуля пружності на розтяг, $n_{Et}$	Міцність деревини (паралельно до волокон), $f_w, \text{Мпа}$	Модуль пружності деревини (паралельно до волокон), $E_w, \text{Гпа}$
20	1	1	1	1	65	12
100	0.25	0.4	0.35	0.5		
300	0	0	0	0		

Використовуючи дані рис. 5.4 та табл. 5.1, були побудовані діаграми



деформування, що наведені на рис. 5.5.

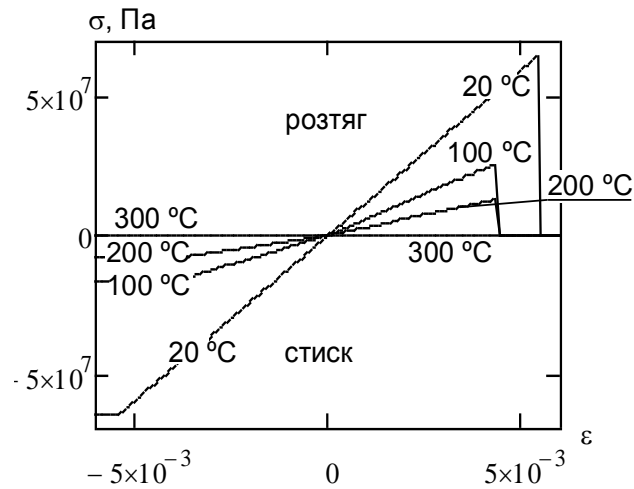


Рис. 5.5. Діаграми деформування деревини при різних температурах нагріву

Наведені діаграми мають вигляд, описаний у роботах [124; 125]. Такий вигляд діаграм дозволяє чітко визначити максимальне значення моменту, при якому відбувається руйнування балки.

Діаграми деформування деревини виражаються кусково-лінійними функціями, які можна використовувати для визначення найбільшого моменту, що може витримати балка в даний момент її нагрівання за стандартним температурним режимом пожежі.

Типова функція для побудування діаграми деформації деревини у залежності від температури має вигляд

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon) &= -n_{wc}f_w \text{ при } \varepsilon \leq -n_{wc}f_w/(n_{Ec}E_w); \\ \sigma(\varepsilon) &= -n_{Ec}E_w\varepsilon \text{ при } -n_{wc}f_w/(n_{Ec}E_w) < \varepsilon \leq 0; \\ \sigma(\varepsilon) &= n_{Et}E_w\varepsilon \text{ при } 0 < \varepsilon \leq n_{wf}f_w/(n_{Et}E_w); \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\sigma(\varepsilon) = n_{wf}f_w - 10^4 \cdot n_{wf}f_w(\varepsilon - n_{wf}f_w/(n_{Et}E_w)) \text{ при } n_{wf}f_w/(n_{Et}E_w) \leq \varepsilon < n_{wf}f_w/(n_{Et}E_w) + 10^{-4}.$$

На рис. 5.5 діаграма деформування, що відповідає температурі 200° С, побудована шляхом лінійної інтерполяції коефіцієнтів, що наведені у абл. 5.1.

При визначенні відносної деформації певного шару за кривизною балки застосовується гіпотеза плоских перерізів. Згідно із цією гіпотезою відносна деформація визначається за формулою

$$\varepsilon_{w_{i,j}} = x_{w_{i,j}} \cdot \chi, \quad (5.6)$$

де  $x_{w_{i,j}}$  – відстань центру зони до горизонтальної центральної вісі перерізу.

У останній формулі максимальна кривизна балки пов'язується із її максимальним прогином за формулою

$$\chi_{max} = \frac{48D}{5L^2} = 24 \cdot 10^{-3} b^{-1}. \quad (5.7)$$

### 5.1.2. Методика розв'язання міцнісної задачі

Для розв'язання міцнісної задачі запропонованим методом розрахунок проводиться за методикою, що описана нижче [128].

1. Переріз балки розбивається на прямокутні зони, у кожній з яких визначається температура як середнє значення з температур чотирьох вузлових точок даної зони, відомих з результатів розв'язання теплотехнічної задачі. Визначені температури записуються у вигляді матриць для кожного моменту часу.

2. Будуються чотири супутні матриці коефіцієнтів зменшення міцності і модуля пружності на розтяг і на стиск у кожний контрольний момент часу.

3. В кожний поточний момент часу визначаються функції залежності напружень у даній зоні від деформацій, за якими будуються діаграми деформування типу таких, що подані на рис. 5.5, за допомогою виразу (5.5) та абл. 5.1.

4. Організовується обчислювальний цикл, у ході виконання якого покроково збільшується кривизна балки до максимального значення, що визначається за формулою (5.7). При цьому будується вектор моментів, відповідних наданому поточному значенню кривизни у кожний контрольний момент часу.

5. З отриманих значень моменту вибирається найбільше значення, яке записується як найбільше зусилля, що витримується балкою, тобто її несуча здатність.

6. Із отриманих значень несучої здатності балки для кожного поточного моменту часу будується відповідний вектор.

7. За отриманим вектором значень несучої здатності будується графік її залежності від часу дії пожежі.

8. Отриманий графік може бути використаний для визначення межі вогнестійкості шляхом порівняння значення несучої здатності і діючого навантаження.

Для реалізації розробленої методики інтервал для визначення контрольних моментів часу вибирається з огляду на стандарти, що регламентують методики проведення випробувань балок на вогнестійкість [53; 126; 127].

Діюче навантаження для визначення межі вогнестійкості балки приймається з огляду на рекомендовані стандартами запаси міцності для проектування конструкцій та коефіцієнт зниження діючого навантаження при пожежі [53; 126; 127].

Таким чином, діюче навантаження має бути визначене за формулою

$$M_{Ed,fi} = 0.4M_{max}, \quad (5.7)$$

де  $M_{max}$  – максимальна несуча здатність балки за нормальних температур.

## 5.2. Результати розв'язку міцнісної задачі за стандартними методиками

Згідно з розрахунками, що наведені у попередньому розділі, міцнісна задача розв'язувалася для п'яти випадків – теоретичного розподілу температур у балці, розподілу температур у балці, що визначений запропонованим нами способом для балки без вогнезахисту та балок із трьома типами вогнезахисного просочення.

При розрахунку супутніх матриць коефіцієнтів і діаграм деформування для побудови теоретичного розподілу температур були отримані результати, що наведені на рис. 5.6.

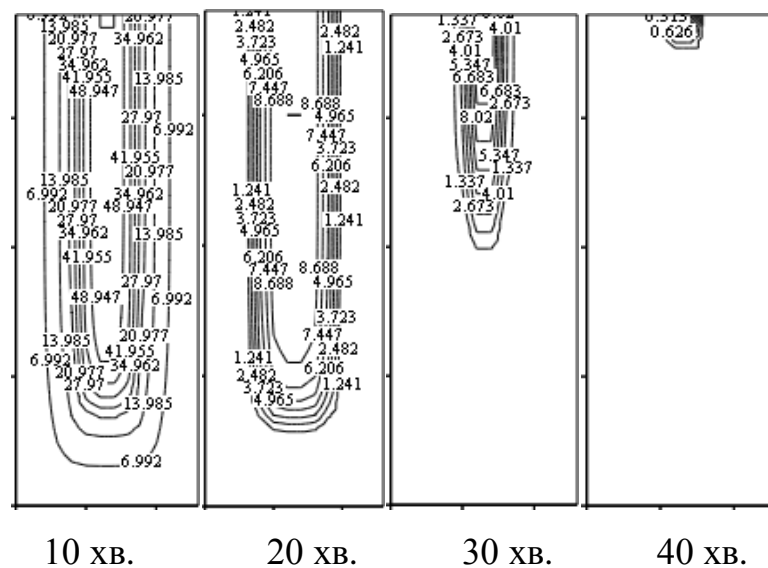
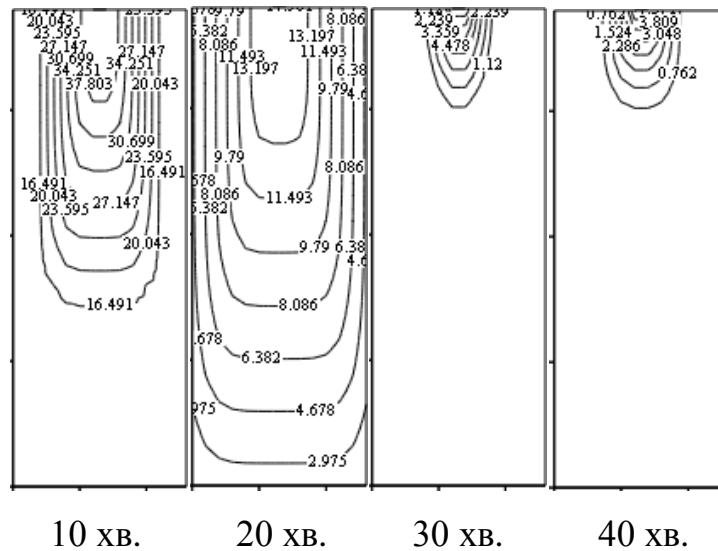


Рис. 5.6. Розподіл значень міцності (МПа) на стискання для теоретичного розподілу температур у дерев'яній балці

На рис. 5.7 – рис. 5.8 наведені аналогічні результати для трьох інших випадків.

Аналізуючи рис. 5.6 – рис. 5.7, можна помітити, що вони розрізняються. Відмінності полягають у тому, що на перших 20 хв. теоретичні дані дають меншу міцність, аніж експериментальні, у той же час

після 20 хв. міцність зменшується інтенсивніше за експериментальними даними.



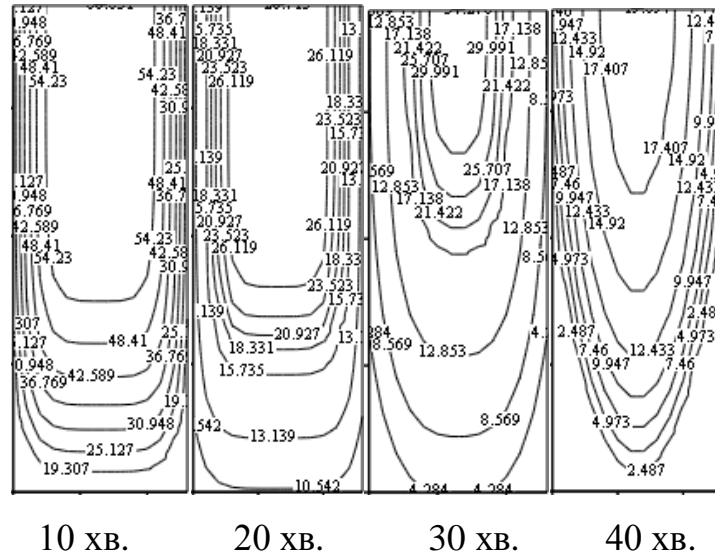


Рис. 5.9. Розподіл значень міцності (МПа) на стискання для розподілу температур, визначених експериментально, у дерев'яній балці з вогнезахисним просоченням II типу

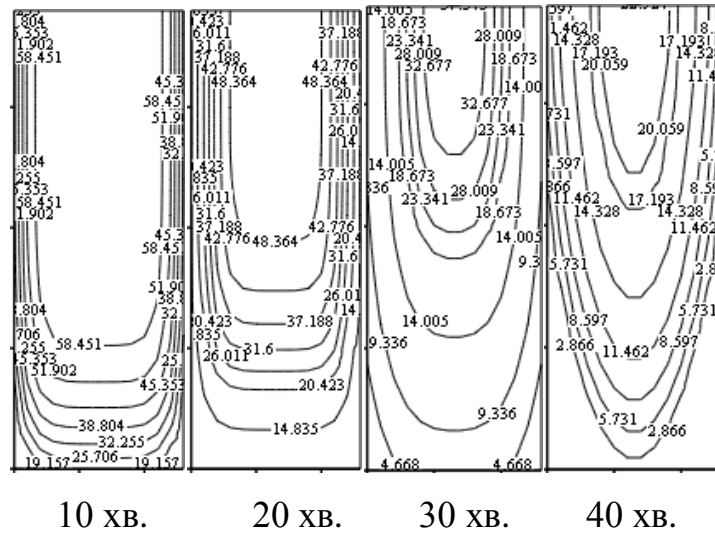


Рис. 5.10. Розподіл значень міцності (МПа) на стискання для розподілу температур, визначених експериментально, у дерев'яній балці з вогнезахисним просоченням III типу

Для оцінки вогнестійкості були побудовані залежності моментів від

кривизни балки. На рис. 5.11 наведені графіки таких залежностей для дерев'яної балки без вогнезахисту.

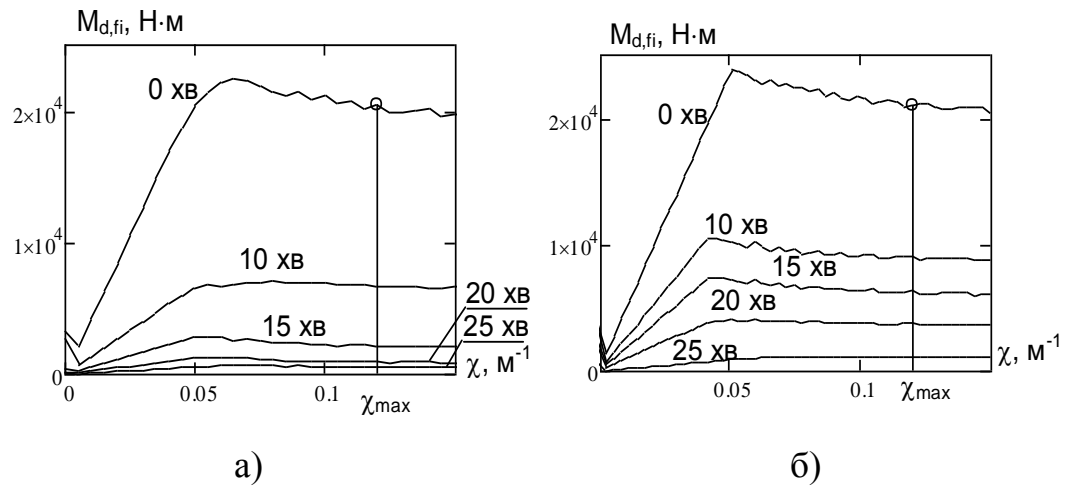


Рис. 5.11. Залежності моменту у небезпечному перерізі балки без вогнезахисту від її кривизни при поступовому збільшенні за теоретичними розрахунками температур (а), за експериментальними даними (б)

Згідно із отриманими даними можна побачити, що найбільшу міцність мають внутрішні шари балок, що просочені засобами II та III типу, причому останні є помітно міцнішими за всі інші балки. Це непрямо вказує на те, що при застосуванні вогнезахисних просочень вогнестійкість балки підвищується.

Дані на рис. 5.11 показують, що графіки залежностей моментів від кривизни балки при поступовому її збільшенні є подібними, і помітно починають відрізнятися, починаючи з 15 хвилини. За експериментальними даними міцність балки зменшується повільніше за міцність такої ж самої балки згідно з теоретичними розрахунками.

Результати досліджень для балок із вогнезахистом I та II типів наведені на рис. 5.12.

На рис. 5.13 наведені результати досліджень для балки із вогнезахисним просоченням III типу.

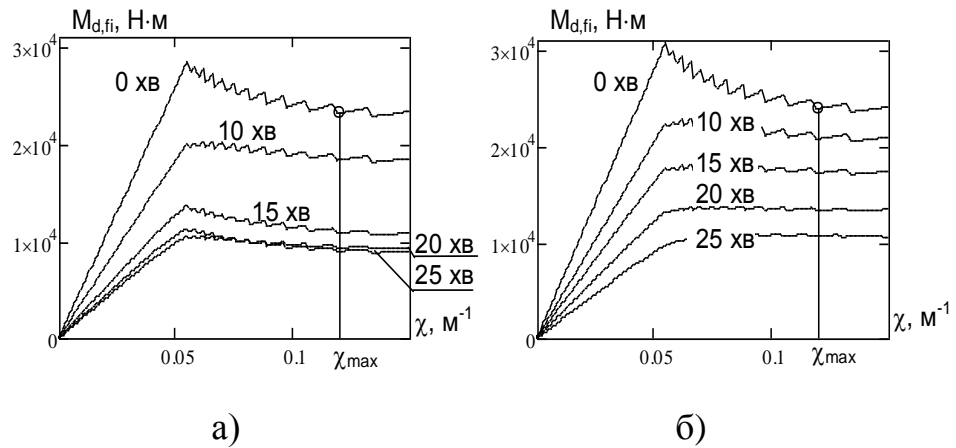


Рис. 5.12. Залежності моменту у небезпечному перерізі балки із вогнезахистом I типу (а), II типу (б) від її кривизни при поступовому збільшенні

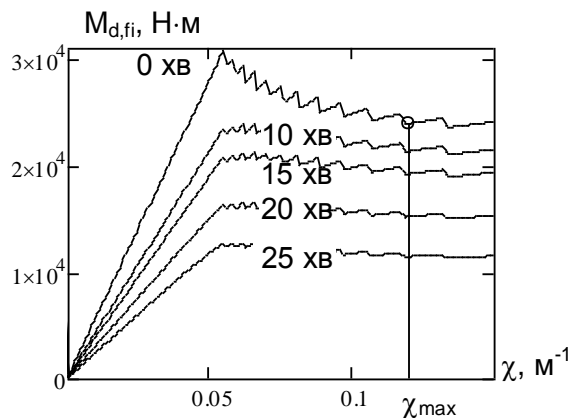


Рис. 5.13. Залежності моменту у небезпечному перерізі балки із вогнезахистом III типу

Дані рис. 5.11 – рис. 5.13 показують, що наявний вогнезахист балок дає помітний ефект, і результати для вогнезахисених балок є подібними. Графіки зниження міцності балок із вогнезахистом показують, що наявність вогнезахисту повинна суттєво підвищити вогнестійкість, оскільки, у порівнянні із результатами для балок без вогнезахисту для однакових моментів часу, міцність балок із вогнезахистом помітно більша.

Також можна помітити, що балки з вогнезахистом II та III типів мають більшу міцність, ніж балки із вогнезахистом I типу.



Для визначення межі вогнестійкості були побудовані залежності несучої здатності дерев'яної балки від часу вогневої дії пожежі.

На рис. 5.14 наведені залежності несучої здатності балки без вогнезахисту для результатів теоретичного розрахунку температурних розподілів, експериментальних даних, а також балок із вогнезахисними просоченнями I, II та III типів.

На рис. 5.14 також показане значення діючого моменту, що визначене за формулою (5.7). За графіками на рис. 5.15 була визначена межа вогнестійкості досліджуваних дерев'яних балок.

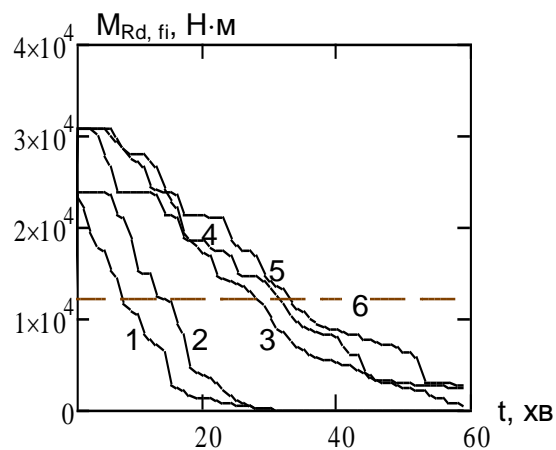


Рис. 5.14. Залежності максимального моменту від часу вогневого впливу пожежі: 1 – дерев'яної балки із теоретичними температурними розподілами; 2 – дерев'яної балки із експериментальними температурними розподілами; 3 – дерев'яної балки із вогнезахисним просоченням I типу; 4 – дерев'яної балки із вогнезахисним просоченням II типу; 5 – дерев'яної балки із вогнезахисним просоченням III типу; 6 – діючий момент у небезпечному перерізі балки

Межі вогнестійкості, що визначені за графіками на рис. 5.14, зведені до табл. 5.2

Таблиця 5.2

Межі вогнестійкості для дерев'яних балок без врахування зони  
обвуглювання

Тип дерев'яної балки	Межа вогнестійкості, хв.
Балка без вогнезахисту із теоретичним розподілом температури по перерізу	9
Балка без вогнезахисту із розподілом температури, за експериментальними даними	17
Балка із вогнезахисним просоченням I типу	28
Балка із вогнезахисним просоченням II типу	31
Балка із вогнезахисним просоченням III типу	33

Дані табл. 5.2 показують, що вогнезахисні просочення мають помітний ефект при підвищенні вогнестійкості дерев'яних балок, але даний ефект є недостатнім, оскільки не дозволяє забезпечити необхідної межі вогнестійкості при необхідних класах вогнестійкості R 45 та R 60.

При визначенні меж вогнестійкості не була врахована зона обвуглювання, оскільки у рекомендаціях, згідно із стандартами та відомими роботами щодо відповідних розрахунків [53; 126], при температурі 300°C міцність та модуль пружності при стисканні та розтягу дорівнюють нулю. Це дозволяє не враховувати зону обвуглювання, оскільки вважається, що відповідні міцнісні розрахунки за таких умов і так її враховують. Аналіз рис. 5.7 – рис. 5.10 показав, що при порівнянні зон нульової міцності та зон обвуглювання, ці зони не збігаються, і зона, де міцність зберігається, може потрапити у зону обвуглювання. Тому розподіли відповідних міцнісних характеристик потрібно обмежувати зоною обвуглювання.

### 5.3. Результати розв'язку міцнісної задачі з врахуванням зони обвуглювання

При визначенні супутніх матриць коефіцієнтів, діаграм деформування

та побудові теоретичного розподілу температур з врахуванням зони обуглювання, були отримані результати, які наведені н рис. 5.15 – рис. 5.17.

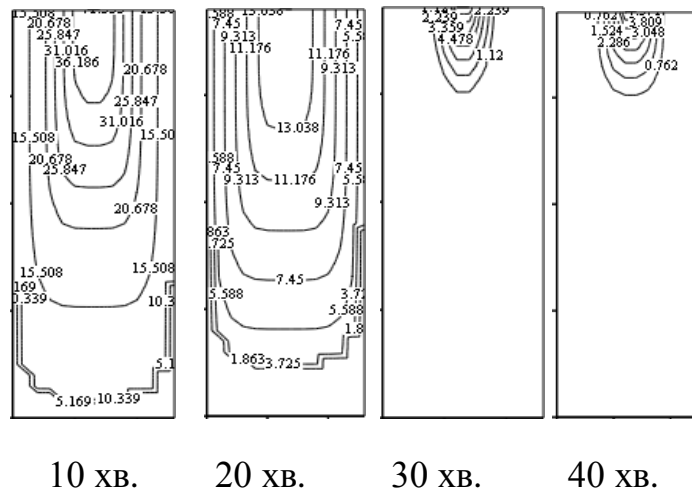


Рис. 5.15. Розподіл значень міцності (МПа) на стискання для розподілу температур, визначених експериментально, у дерев'яній балці без просочення з врахуванням зони обуглювання

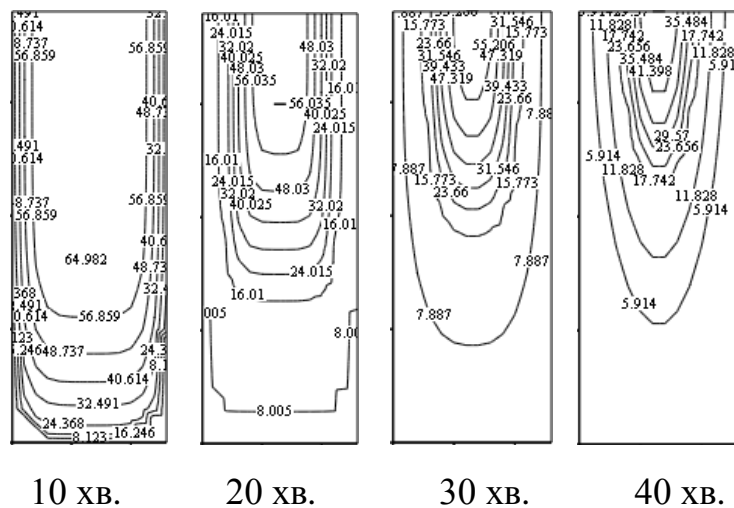


Рис. 5.16. Розподіл значень міцності (МПа) на стискання для розподілу температур, визначених експериментально, у дерев'яній балці з вогнезахисним просоченням I типу з врахуванням зони обуглювання

Аналізуючи рис. 5.15 – рис. 5.18, можна помітити, що вони

відрізняються від рис. 5.7 – рис. 5.10. Відмінності полягають у тому, що, при врахуванні зони обвуглювання, міцність у даній зоні дорівнює нулю на відміну від розподілів міцності, де зона обвуглювання не враховується.

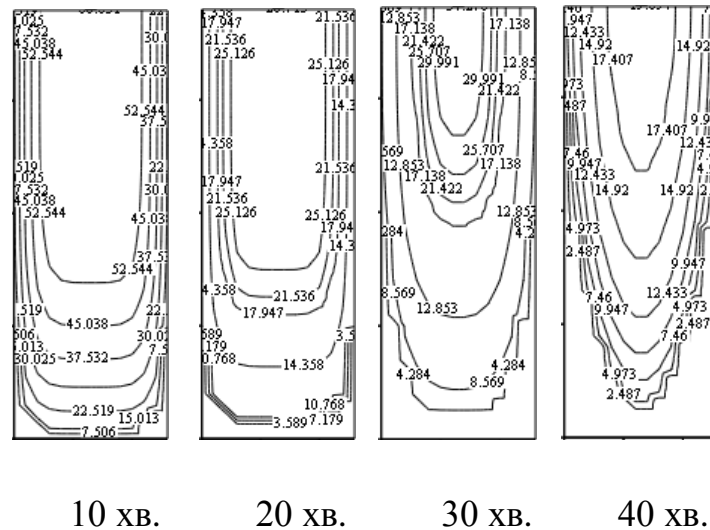


Рис. 5.17. Розподіл значень міцності (МПа) на стискання для розподілу температур, визначених експериментально, у дерев'яній балці з вогнезахисним просоченням II типу з врахуванням зони обвуглювання

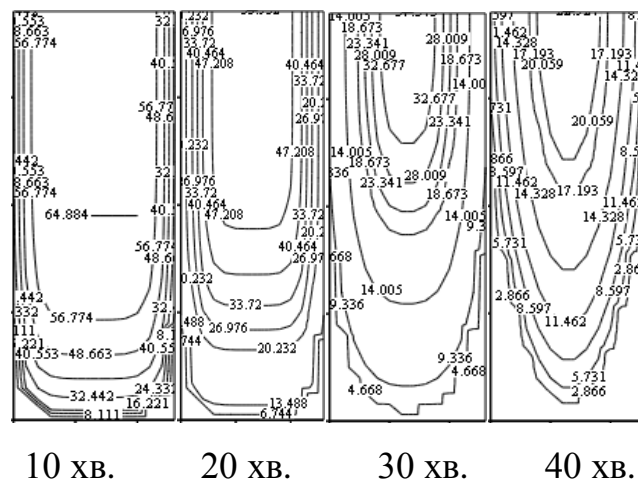


Рис. 5.18. Розподіл значень міцності (МПа) на стискання для розподілення температур, визначених експериментально, у дерев'яній балці з вогнезахисним просоченням III типу з врахуванням зони обвуглювання

На рис. 5.19 також показане значення діючого моменту, що визначене за формулою (5.7). За графіками на рис. 5.19 була визначена межа вогнестійкості досліджуваних дерев'яних балок.

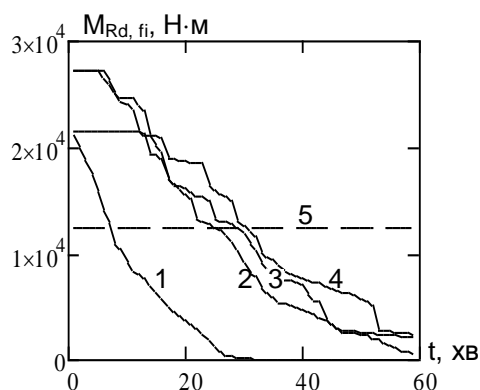


Рис. 5.19. Залежності максимального моменту від часу вогневого впливу пожежі з врахуванням зони обвуглювання: 1 – дерев'яної балки із експериментальними температурними розподілами; 2 – дерев'яної балки із вогнезахисним просоченням I типу; 3 – дерев'яної балки із вогнезахисним просоченням II типу; 4 – дерев'яної балки із вогнезахисним просоченням III типу; 5 – діючий момент у небезпечному перерізі балки

Межі вогнестійкості, що визначені за графіками на рис. 5.19, зведені до табл. 5.3.

Дані табл. 5.3 показують, що межа вогнестійкості помітно зменшується, якщо зона обвуглювання враховується. Особливо це помітно для балки із вогнезахисним просоченням I типу. У результаті проведеного аналізу отримано, що похибка при неврахуванні реальної конфігурації зони обвуглювання може досягати значення 58 %.

В обох випадках є зрозумілим, що наявність вогнезахисного просочення не може забезпечувати клас вогнестійкості R 45 та R60. Проведені дослідження у черговий раз підкреслюють необхідність оцінки

вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисними просочуваннями за допомогою стандартних вогневих випробувань або на основі розрахункових методів.

Таблиця 5.3

Межі вогнестійкості для дерев'яних балок з врахуванням обвуглювання

Тип дерев'яної балки	Межа вогнестійкості, хв.	Абсолютне відхилення від даних табл. 5.2, хв.	Відносне відхилення від даних табл. 5.2, %
Балка без вогнезахисту із розподілом температури, за експертними даними	7	10	58
Балка із вогнезахисним просоченням I типу	24	4	16.7
Балка із вогнезахисним просоченням II типу	29	2	6.5
Балка із вогнезахисним просоченням III типу	31	2	6.1

Проведені дослідження показали можливість розробки розрахункового метода оцінки вогнестійкості за допомогою розкритих закономірностей зміни конфігурації зони обвуглювання на основі визначення критичної температури обвуглювання деревини балки на основі формули (4.19) та залежностей, визначених експериментальним шляхом, які наведені у табл. 4.2.

#### **5.4. Метод розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням**

З огляду на проведення дослідження можна сформулювати основні положення методу розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисними просоченнями. Для реалізації запропонованого методу необхідно виконання наступних процедур.

1. Визначення температурних розподілень у кожний контрольний момент часу розвитку пожежі за допомогою розв'язку рівняння теплопровідності (4.1) за допомогою одного з чисельних методів – кінцевих різниць або кінцевих елементів .

2. За формулою (4.19) експериментальних залежностей типу наведених у табл. 4.2 для того чи іншого виду вогнезахисного просочування визначається критична температура у кожний контрольний момент часу розвитку пожежі.

3. За ізотермою, відповідною визначеній критичній температурі, визначається конфігурація зони обуглювання, що відсікається цією ізотермою, у кожний контрольний момент часу розвитку пожежі.

4. За температурним полем у зоні, що не піддалася обуглюванню, визначаються міцнісні та деформативні характеристики деревини за методикою, що описана у попередньому пункті у кожний контрольний момент часу розвитку пожежі.

5. За методом збільшення деформації визначається несуча здатність дерев'яної балки із вогнезахистом у кожний контрольний момент часу розвитку пожежі.

6. За отриманими значеннями будується крива зниження несучої здатності із часом розвитку пожежі.

7. Шляхом порівняння у кожний момент часу розвитку пожежі несучої здатності балки і діючого навантаження визначається час, коли діюче навантаження стає рівним або більшим за несучу здатність, який і буде часом настання граничного стану її втрати.

Для відпрацювання процедур метода була розглянута дерев'яна балка квадратного перерізу. Розрахункова схема перерізу балки наведена на рис. 5.20.

Згідно із алгоритмом запропонованого методу були отримані температурні розподіли, наведені на рис. 5.21.

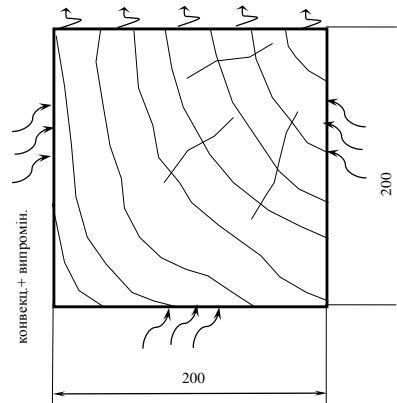


Рис. 5.20. Розрахункова схема перерізу дерев'яної балки для відпрацювання процедур запропонованого метода розрахункової оцінки вогнестійкості

Застосовуючи підхід для визначення конфігурації зони обвуглювання, були визначені обвуглені зони для перерізу балок з вогнезахисними просоченнями та без них. Результати представлені на рис. 5.22 – рис. 5.25.

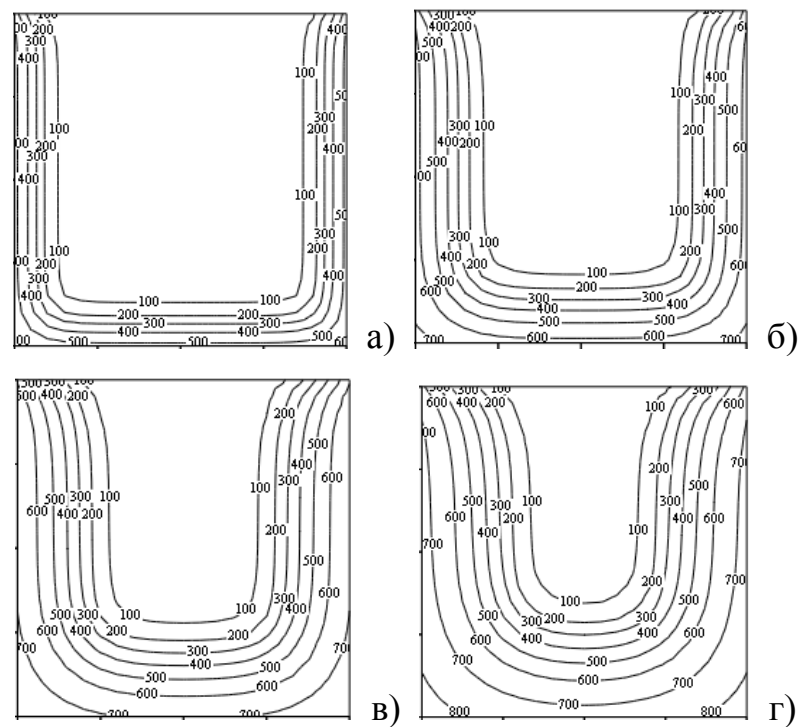


Рис. 5.21. Температурні розподіли у перерізі дерев'яної балки та відповідні шкали у моменти часу: а – 15 хв.; б – 30 хв.; в – 45 хв.; г – 60 хв.



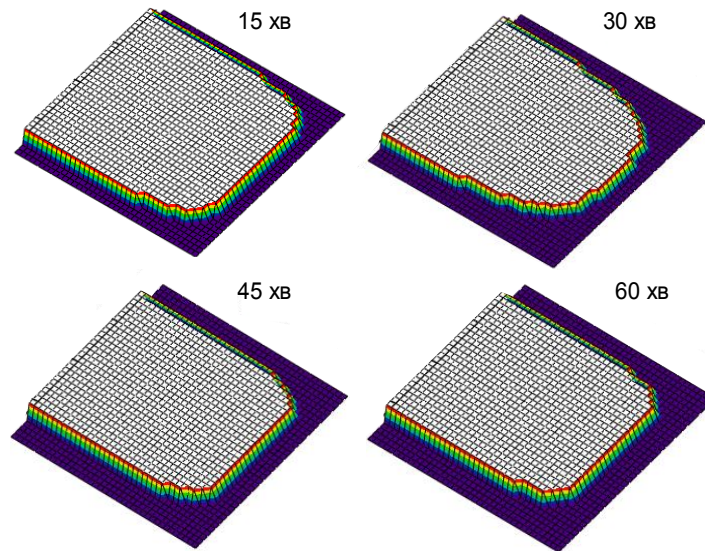


Рис. 5.22. Динаміка зміни обвугленої зони у перерізі балки без вогнезахисного просочення

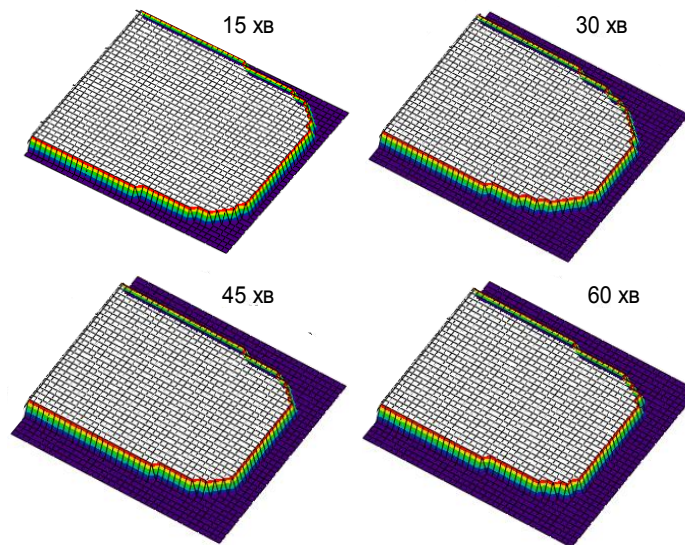


Рис. 5.23. Динаміка зміни обвугленої зони у перерізі балки з вогнезахисним просоченням I типу

На рис. 5.22 – рис. 5.25 можна побачити, що вогнезахисні просочення дають ефект уповільнення збільшення обвугленої зони, що відповідає дійсній картині.

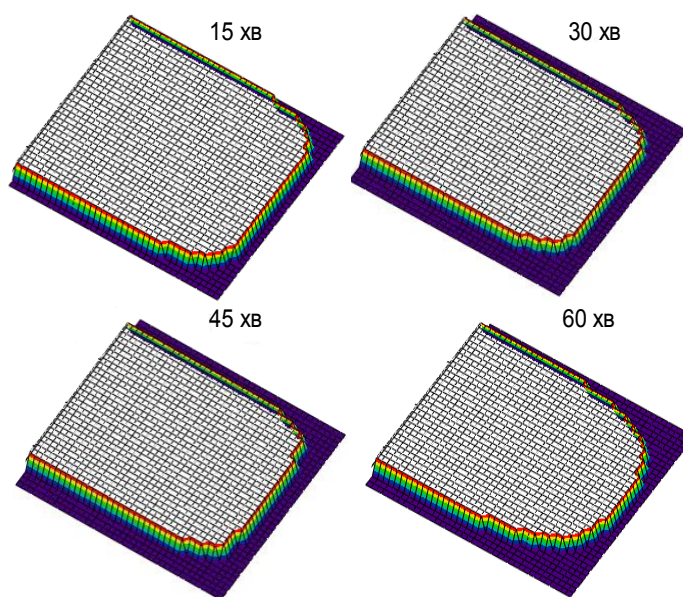


Рис. 5.24. Динаміка зміни обвугленої зони у перерізі балки з вогнезахисним просоченням II типу

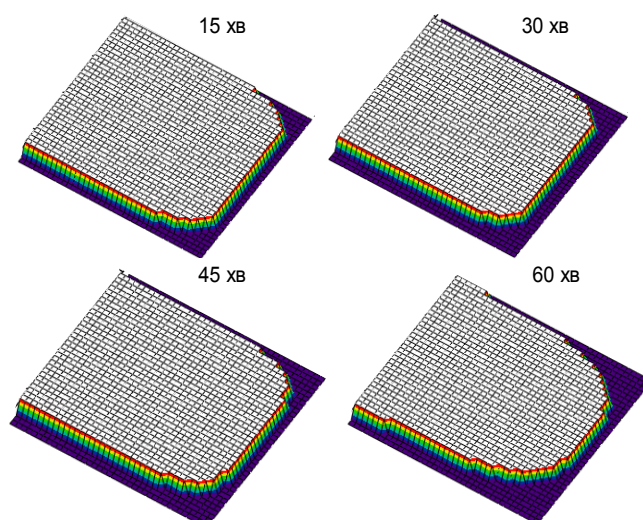


Рис. 5.25. Динаміка зміни обвугленої зони у перерізі балки з вогнезахисним просоченням III типу

З наведених даних щодо конфігурації обвугленої зони перерізу можна побачити, що найбільшу вогнезахисну здатність має вогнезахисний засіб III типу.

Використовуючи отримані конфігурації обвугленої зони, можна визначити розподіли механічних характеристик по перерізу дерев'яної балки, вогнестійкість якої піддається оцінці запропонованим нами методом. На рис. 5.26 показаний типовий розподіл міцності деревини відповідно до температури прогріву внутрішніх шарів перерізу.

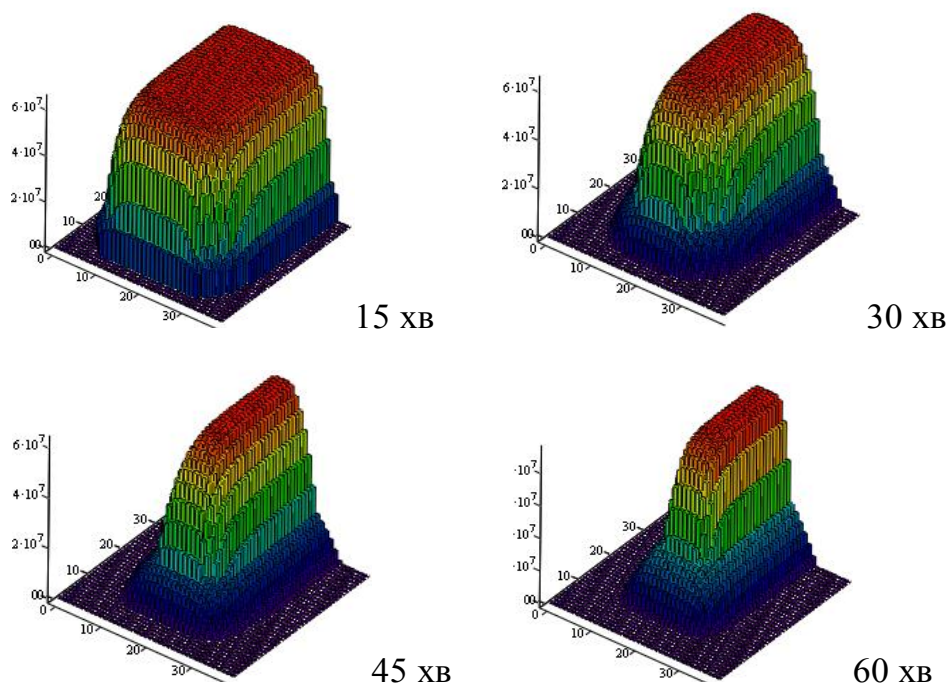


Рис. 5.26. Типові розподіли міцності деревини у перерізі балок з вогнезахисним просоченням і без нього у різні моменти часу вогневого впливу пожежі

Межі вогнестійкості, що визначені за графіками на рис. 5.21 зведені до табл. 5.4.

Дані табл. 5.4 показують, що межа вогнестійкості із кращим вогнезахисним засобом підвищується лише на 5 хвилин, тобто вогнезахисне просочення слабо впливає на межу вогнестійкості масивних дерев'яних балок. Тому для подібних балок вогнезахисні просочення є неефективним вогнезахистом. Також можна зазначити, що розроблений розрахунковий

метод оцінки вогнестійкості є ефективним тільки для дерев'яних балок із перерізом з малою товщиною.

Таблиця 5.4

Межі вогнестійкості для дерев'яних балок перерізу 200×200 із вогнезахистом і без нього

Тип дерев'яної балки	Межа вогнестійкості, хв.
Балка без вогнезахисту	31
Балка із вогнезахисним просоченням I типу	33
Балка із вогнезахисним просоченням II типу	35
Балка із вогнезахисним просоченням III типу	36

### **5.5. Ефективність метода розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням**

З огляду на те, що вогнезахисні просочення є ефективними тільки для тонких балок, які швидко вигорають, було проведене дослідження щодо впливу товщини балки на ефективність вогнезахисних просочень із застосуванням запропонованого метода. Ефективність вогнезахисної дії просочень, що вивчаються, визначається часом підвищення межі вогнестійкості завдяки застосуванню цих просочень. Вказаний час визначається за допомогою запропонованого нами метода оцінки вогнестійкості вогнезахисних дерев'яних балок. Застосувавши описаний підхід, були вивчені три типи соснових балок із змінною товщиною перерізу. Міцнісні характеристики деревини наведені у табл. 5.1. У табл. 5.5. наведені параметри балок, що досліджувалися.

На рис. 5.27 наведені залежності часу, на який підвищується межа вогнестійкості дерев'яної балки при застосуванні вогнезахисного просочення, від її товщини.

Таблиця 5.5

Параметри дерев'яних балок для вивчення ефективності вогнезахисної дії просочень

Тип дерев'яної балки	Висота перерізу, мм	Діапазон ширини перерізу, мм
1 тип	200	35 ÷ 200
2 тип	300	
3 тип	400	

Аналіз графіків на рис. 5.27 показує, що із збільшенням ширини перерізу дерев'яної балки до 200 мм вогнезахисні просочення для підвищення межі вогнестійкості є малоефективними, оскільки її підвищення відбувається максимум на 2-3 хв. Це означає також, що і застосування методу врахування зони обвуглювання для балок із перерізами такої ширини, не є ефективним.

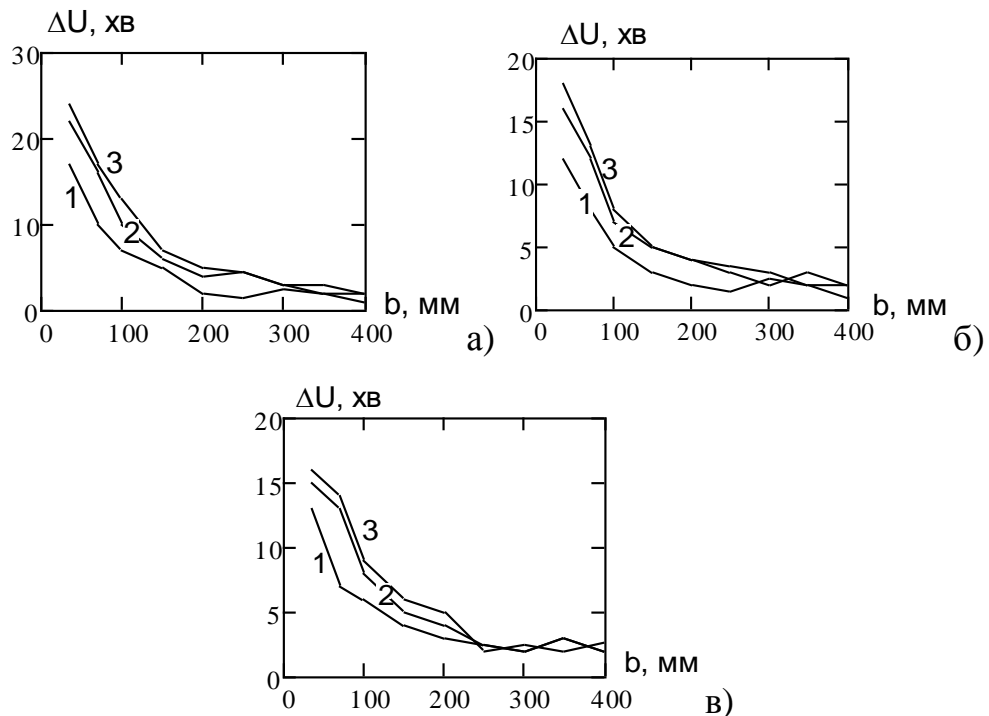


Рис. 5.27. Залежності часу, на який підвищується межа вогнестійкості дерев'яної балки висотою перерізу 200 мм (а), 300 мм (б) та 400 мм (в), від її товщини для вогнезахисного просочення: 1 – I типу; 2 – II типу; 3 – III типу.

Таким чином, запропонований метод оцінки вогнестійкості вогнезахищених дерев'яних балок найбільш ефективно застосовується для балок із шириною поперечного перерізу не більше за 200 мм.

Для того, щоб знайти величину можливої похибки при визначенні межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахистом запропонованим методом, доцільно застосувати метод збурень. Метод збурень полягає у наданні вихідним даним збурення на величину можливої похибки [128 – 130].

Визначенні за методом «збурень» збуренні дані всіх відповідних параметрів двох запропонованих методі, а саме метод описаний в Єврокодi та нами запропонований. Проведення з цими параметрами відповідних розрахунків і порівняння отриманих результатів із результатами, отримані для початкових даних без «збурення».

Для реалізації методу збурень у якості початкових даних, яким будуть надані збурення, є значення геометричних параметрів зони обвуглювання. Похибки, що отримані при вимірюваннях, наведені на рис. 3.10.

Після врахування збурень були побудовані нові регресійні залежності товщини зони обвуглювання від часу експонування досліджених балок і на основі них за алгоритмом, наведеним у п. 5.4 визначені межі вогнестійкості. Відхилення, отримані при цьому, наведені у табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Дані щодо похибки метода розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням

Тип дерев'яної балки	Абсолютне відхилення, хв.	Відносне відхилення, %	Середнє відносне відхилення, %
Без просочення	1	11,1	11.7
Просочення I типу	3	12.5	
Просочення II типу	3	10.3	
Просочення III типу	4	12.9	

Дані табл. 5.6 свідчать, що точність запропонованого метода є достатньою, оскільки середнє відносне відхилення результатів, що отримані за допомогою нього, складає 11.7%, а амплітудне значення не перевищує 12.9%.

Для порівняння розглядалися результати, що отримані за розробленим методом та методом, заснованим на розрахункових методиках EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2 з використанням формул (1.9) – (1.14). При цьому була розглянута балка 75×200. У результаті розрахунку визначена межа вогнестійкості, що склала 6.2 хв. У порівнянні з результатами розрахунку похибка результатів, що отримані за методом, описаним у другій частині Eurocode 5, відповідно для балок без вогнезахисту із I, II та III типом вогнезахисного просочення склала 11,4 %, 74,2 %, 78,6 % та 80 %. Аналогічно була розглянута балка 200×200. У результаті розрахунку визначена межа вогнестійкості, що склала 27.5 хв. У порівнянні з результатами розрахунку похибка відповідно балок без вогнезахисту із I, II та III типом вогнезахисного просочення склала 8,1 %, 13,6 %, 18,6 % та 20,8 %.

Отримані значення середньої похибки складають 58 % відповідно. Це показує високу точність розробленого методу.

## **5.6. Висновки**

1. Обґрунтовано метод розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисними просочуваннями, що підвищує точність оцінки на 58%.

2. Вогнезахисні просочення мають помітний ефект при підвищенні вогнестійкості дерев'яних балок, але даний ефект є недостатнім, оскільки не дозволяє забезпечити необхідну межу вогнестійкості при вимагаємих класах вогнестійкості R 45 та R 60.

3. З'ясовано, що найбільш ефективним просоченням для підвищення вогнестійкості балки, фрагмент якої досліджувався, є вогнезахисне просочення III типу.

4. Виявлено, що збільшення ширини перерізу дерев'яної балки до 200 мм призводить до суттєвого зменшення ефективності вогнезахисних просочень для підвищення межі вогнестійкості, оскільки її підвищення відбувається максимум на 2-3 хв.

5. На основі виявлених закономірностей розроблено методику математичного описання зони обвуглювання дерев'яних балок із висотою перерізів 100 мм, 200 мм, 400 мм та з шириною у діапазоні від 35 до 400 мм із вогнезахисними просочуваннями під впливом пожежі із стандартним температурним режимом.

6. Досліджено ефективність розробленого методу розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисними просочуваннями і встановлено, що межі його застосування лежать в інтервалі до 200 мм товщини балки.

7. Обґрунтовано розрахунковий метод визначення межі вогнестійкості на основі розв'язку міцнісної задачі за температурними даними випробувань та зоною обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисними просочуваннями, який дає точніші результати, оскільки обчислені із застосуванням цього методу межі вогнестійкості мають похибку не більше 12,9%. При врахуванні вогнезахисного просочення для балки 70x200 точність збільшилася у середньому на 77,6%, а для балки 200x200 – на 17,6% порівняно із існуючим методом, описаним в Eurocode 5.



## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведені результати розв'язання актуальної науково-практичної задачі щодо підвищення точності розрахункового методу оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням шляхом врахування закономірностей зміни геометричних параметрів їх зони обвуглювання у залежності від часу вогневого впливу пожежі. При цьому одержані такі основні результати:

1. Проведено аналіз сучасного стану щодо нормування вогнестійкості дерев'яних балок та методів визначення класів їх вогнестійкості розрахунковим шляхом, у результаті чого виявлено, що існуючий метод розрахунку має суттєвий недолік, який полягає у неможливості у повній мірі відтворити умови зміни геометричних параметрів зони обвуглювання, так як при цьому не враховуються вплив вогнезахисного просочення на геометрію обвугленої зони.

2. На основі експериментальних досліджень поведінки дерев'яних балок із вогнезахисними просочуваннями в умовах вогневого впливу пожежі із стандартним температурним режимом визначені розподіли температури у перерізі фрагментів дерев'яних балок, їхні значення для теоретичних розрахунків має максимальну температуру для 15 хв. – 500 °С, 30 хв. – 700 °С, 45 хв. – 800 °С та 60 хв. – 850 °С в порівнянні для зразків без вогнезахисного просочення 15 хв. – 600 °С, 30 хв. – 700 °С, 45 хв. – 800 °С та 60 хв. – 850 °С, що свідчить про достовірність отриманих розрахункових значень та на основі температурних даних виявлено закономірності змінення геометричних характеристик зони обвуглювання дерев'яних балок із вогнезахисними просочуваннями у залежності від часу експонування вогневого впливу пожежі із стандартним температурним режимом протягом 60 хв.

3. На основі виявлених закономірностей розроблено методіку

математичного описання зони обвуглювання дерев'яних балок із висотою перерізів 100 мм, 200 мм, 400 мм та з шириною у діапазоні від 35 мм до 400 мм із вогнезахисними просоченнями під впливом пожежі із стандартним температурним режимом.

4. Розвинено математичний апарат інтерполяції температурних полів дерев'яних балок за вимірюваннями температури у контрольних точках, заснований на представленні інтерполяційної функції у вигляді параболічної залежності із ступенем, показник якого залежить від часу експонування балок при вогневій дії в умовах випробувань на вогнестійкість за стандартним температурним режимом пожежі протягом 60 хв.

5. Отримано математичне описання зони обвуглювання, на основі чого було обґрунтовано розрахунковий метод оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисними просоченнями. Це дало змогу підвищити точність оцінки вогнестійкості на 58%.

6. Обґрунтовано розрахунковий метод визначення межі вогнестійкості на основі розв'язку міцнісної задачі за температурними даними випробувань та зоною обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисними просочуваннями, який дає точніші результати, оскільки обчислені із застосуванням цього методу межі вогнестійкості мають похибку не більше 12,9%. При врахуванні вогнезахисного просочення для балки 70×200 точність збільшилася у середньому на 77,6%, а для . балки 200×200 – на 17,6 % порівняно із існуючим методом описаним в Eurocode 5.

7. Досліджено ефективність розробленого розрахункового методу оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисними просоченнями і встановлено, що межі його застосування лежать в інтервалі до 200 мм товщини балки.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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 2012 рік. //Пожежна безпека // Всеукраїнський науково-виробничий Журнал – 2013. – № 2. С. 30-34.
3. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 2013 рік. //Пожежна та техногенна безпека // Всеукраїнський науково-виробничий Журнал – 2014. – № 2. С. 32-35.
4. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 2014 рік. //Пожежна та техногенна безпека // Всеукраїнський науково-виробничий Журнал – 2015. – № 2. С. 40-44.
5. Бруєв М.О. Розробка нового методу глибокого просочування деревини надпотужним імпульсом тиску, який утворюються електричним розрядом у рідині: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / М.О. Бруєв. – Київ, 2000. – 18с.
6. Маладика І.Г. Розроблення вогнезахисних та вогнегасних засобів для деревини на основі багатокомпонентних сумішей речовин: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / І.Г. Маладика. – Харків, 2006. – 18 с.
7. Будинки і споруди. Культурно-видовищні та дозвіллеві заклади. ДБН В 2.2-16-2005. [Чинний від 01-04-2006] Держбуд України від 27.09.05 № 171 – 20 с. – (Національний стандарт України).
8. 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. – (Національний стандарт України).
9. 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. – (Національний стандарт України).

10. 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. – (Національний стандарт України).

11. 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. – (Національний стандарт України).

12. 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. – (Національний стандарт України).

13. 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. – (Національний стандарт України).

14. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва: ДБН В.1.1.7-2002. – [Чинний від 2003-05-01]. – К. : Держбуд України, 2003. – 87 с. – (Державні будівельні норми України).

15. Собурь С.В. Огнезащита строительных материалов и конструкций: Справочник / С.В. Собурь. – М.: Спецтехника, 2000. – 112с.

16. Пат. 64361 А Україна, МКН В27К3/00, В27К3/52. Склад для просочення деревини / Орловський І.Ю., Шналь Т.М., Демчина Б.Г., Пархоменко Р.В.; Національний університет «Львівська політехніка». – №2003054550; заявл. 20.05.2003; опубл. 16.02.2004. Бюл. №2. – 2с.

17. Горбаченко Я.В. Теоретическое исследования эффективности огнестойкости деревянных конструкций / Я.В. Горбаченко // Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций: Междунар. науч.-прак. конф., 26-27 сентября 2013 г., Минск: тез. докл. – Минск: КИИ МЧС Республики Беларусь, 2013. – С. 223-224.

18. Богданова В.В. Разработка путей целенаправленного подбора антипиренов для полимеров различных классов / В.В. Богданова, Л.В. Кобец

// II Международной науч.-практ. конф.: Минск: матер. – Минск: РНПЦ ПБ МВД Республики Беларусь, 1997. – С. 119-120.

19. 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., Архангельск: тез. докл. – М., 1980. – С. 384-386.

20. Борисов П.Ф. Повышение эффективности огнезащиты древесины путем последовательной пропитки антипиреном и полимерным антисептиком: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / П.Ф. Борисов. – Харків, 2000. – 18 с.

21. Древесина огнезащищенная. Общие технические требования. Методы испытаний. Транспортирование и хранение: ГОСТ 30219-95 (Межгосударственный стандарт). – 45с.

22. 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.

23. Свойства огнезащитных пропиток для древесины. Методы определения огнезащитных свойств: ГОСТ 16363-98.(Межгосударственный стандарт). – 27 с.

24. Демехин В.Л. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре / В.Л. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюсина и др. – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2003. – 656 с.

25. Мосалков И. Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюсина, А.Ю. Фролов. – М.: ЗАО Спецтехніка – 2001.– 496 с.

26. Соколенко К. І. Дослідження умов застосування вогнезахищеної деревини на об'єктах різного призначення / К.І. Соколенко, Жартовський В. М., Ю.В. Цапко // Зб. наук. праць ЛДУБЖД. – 2006. – Вип. 8.

– С.46 – 52.

27. Дмітрієва Н.В. Вогнебіостійкі епоксидні композиційні матеріали для дерев'яних конструкцій: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / Н.В. Дмітрієва. – Харків, 2005. – с. 20.

28. Тычино Н. А. Особенности практического применения огне-и-биозащитных средств для пропитки древесины / Н.А. Тычино // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. – 2002.– Вып. 6. – С. 38 – 43.

29. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: ГОСТ 12.1.044 – 1989. – С. 143.

30. Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия: ГОСТ 28815 – 1996. – С. 37.

31. Бут В.П. Новые высокоэффективные огнезащитные композиции для древесины ДСА-1 и ДСА-2 / В.П. Бут, В.М. Жартовський, Ю.В. Цапко, О.Г. Барило // Пожаровзрывоопасность. – 2004. – № 4. – С. 39 – 42.

32. Жартовський В.М. Дослідження механізму вогнезахисної ефективності деревини просочувальними композиціями. / Жартовський В.М., В.П. Бут, О.Г. Барило // Коммунальное хозяйство городов. – 2004. – Вып. 55. – С. 219 – 229.

33. Сивенков А.Б. Огнезащитные покрытия на основе модифицированных полисахаридов. Часть 3. Характеристики тепловыделения при пламенном горении и теплофизические свойства. / А.Б. Сивенков, Б.Б. Серков // Пожаровзрывоопасность. – 2002. – Вып. 3. – С. 13 – 19.

34. Борисов П.О. Направления совершенствования огнезащитной пропитки древесины. / П.О. Борисов, В.М. Жатовський, И.В. Харченко // Бюл. пожежної безпеки. – 2000. – Вип. 3. – С. 21 – 23.

35. Цапко Ю.В. Аспекти моделювання процесу висолювання вогнезахисних композицій з деревини / Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2005. – №1 (11). – С. 82 – 85.

36. Борисов П.Ф. Теоретические исследования процесса вымывания антипирена из огнебиозащищенной древесины / П.Ф. Борисов // Коммунальное хозяйство городов. – 2000. – Вып. 29. – С. 263 – 266.

37. Жартовський В.М. Новий підхід к огнебіозащите изделий из целлюлозы / В.М. Жартовський, Ю.В. Цапко, О.Г. Барило // Пожаровзивоопасность. – 2004. – Вып.5. – С. 31-32.

38. Жартовський В.М. Дослідження вогнезахисних та експлуатаційних властивостей деревини, просоченої вогнезахисними засобами / В.М. Жартовський, В.П. Бут, Ю.В. Цапко, О.Г. Барило, О.М. Слущька // Зб. наук. праць ЛПБ. – 2004. – Вип. 4. – С. 17 – 22.

39. Горшков В.И. Самовозгорание веществ и материалов/ В.И. Горшков. – М.: ВНИИПО. – 2003. – С. 446.

40. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения: ГОСТ 2140-81.

41. Пропитка способом «прогрев-холодная ванна»: ГОСТ 20022.6-86.-7 с.

42. Древесина, консервирование. Капиллярная пропитка способом нанесения на поверхность: ГОСТ 20022.9 – 76\*. – 6 с.

43. Защита древесины. Способы пропитки: ГОСТ 20222. 6 – 1993. – 20 с.

44. Саенко А.И. Повышение огнезащиты древесины глубокой пропиткой антипиренами на основе электрогидравлического эффекта: Автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / А.И. Саенко. – Харків, 1998. – 20 с.

45. Защита древесины. Классификация: ГОСТ 20222.2–80. – 24 с.

46. Способы и средства огнезащиты древесины. Руководство.– М: ВНИИПО МВД РФ, 1995. – 18 с.

47. Войтов А.И. Современные гидроизоляционные материалы: Справочник / А.И. Войтов, В.Л. Козачук, В.В. Лайкин, А.А. Скуратовский. – К.: Мастер, 2002. – 192 с.

48. Тычино Н.А. Высокоэффективные огнезащитные средства комбинированного действия для обработки древесины: Автореф. на

соискание ученой степени д-ра техн. наук / Н.А. Тычино. – М. – 2005. – 42 с.

49. Страхов В.Л. Огнезащита строительных конструкций / В.Л. Страхов, А.М. Крутов, Н.Ф. Давыдкин. – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР». – 2000. – 433 с.

50. Jones B. Modeling the Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires and Standard 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).

51. Lu W. Advanced Steel Structures. Structural Fire Design / W. Lu, P. Makelainen // Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 29.-Espoo, 2003.

52. Антисептики для древесины. Методы испытаний на устойчивость к вымыванию: ГОСТ 16713-71.

53. EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures.-Part 1-2: General-Structural fire design.

54. 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.

**55.** Горбаченко Я.В. Порівняння SIP- панелей з іншими будівельними матеріалами за теплотехнічною характеристикою / Я.В. Горбаченко // Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи: Міжнар. наук.-практ. конф., Харків: тез.доп. – Харків: НУЦЗУ, 2013. – С. 153-154.

56. 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.

57. Кисилев Я.С. Физические модели горения в системе предупреждения пожаров / Я.С. Кисилев. – СПб.: Санкт-Петербургский университет МВД России. – 2000.– 263 с.



58. 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.

59. Тычино Н.А. Эксплуатационная надежность огнезащищенных древесных материалов. / Н.А. Тычино // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. – 2002. – Вып. 2. – С. 27 – 30.

60. 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.

61. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. ДСТУ 2272:2006. [Чинний від 2006-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 30 с. – (Національний стандарт України).

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

63. Науменко З. М. Применение клееной фанеры в строительстве / З.М. Науменко // Фанера и плиты. – 1970. – С. 20.

64. Древесина слоистая клеянная. Методы определения предела прочности при скалывании: ГОСТ 9625-87.-1995. М.: Издательство стандартов, 1995.

65. Древесина слоистая клеянная. Методы определения предела прочности и модуля упругости при статистическом изгибе: ГОСТ 9625-87.-1989. М.: Издательство стандартов, 1989.

66. Плиты древесно-стружечные и фанера. Перфораторный метод определения содержания формальдегида: ГОСТ 27678-88.-1990. М.: Издательство стандартов, 1990.

67. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В. 1.1-4-98.

[Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с. – (Національний стандарт України).

68. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. (ISO 834: 1975) ГОСТ 30247.0-94. [Введен в действие 1996-01-01] – М. : Стройиздат, 2003. – 7 с. – (Национальный стандарт РФ).

69. Захист від пожежі. Споруди та фрагменти будівель. Метод натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги. ДСТУ Б В.1.1-18:2007. [Чинний від 2007-10-26.] – К. : Мінрегіонбуд України, 2007. – 9 с. – (Національний стандарт України).

70. Кошмаров Ю.А. Новые методы расчета огнестойкости и огнезащиты современных зданий и сооружений / Ю.А. Кошмаров // Пожарная безопасность. – 2002. – №2. – С. 91-98.

71. Горбаченко Я.В. Існуючі методи випробувань для дерев'яних будівельних конструкціях / Я.В. Горбаченко // Актуальні проблеми технічних та соціально-гуманітарних наук у забезпеченні діяльності служби цивільного захисту: Міжнар. наук.-практ. конф., Черкаси: тези доп. – Черкаси: АПБ імені Героїв Чорнобиля, 2013. – С. 109-112.

72. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов: ГОСТ 9.048-89 ЕСЗКС.

73. Матеріали будівельні. Методи випробувань на горючість: ДСТУ Б В.2.7.-19-95 (ГОСТ 30244-94).

74. Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість: ДСТУ Б В.1.1-2-97( ГОСТ 30402-96). – 28 с.

75. Горбаченко Я.В. Вогнестійкість дерев'яних балок з вогнезахистом/ Я.В. Горбаченко, С.В. Поздєєв, О.В. Некора, О.М. Тищенко, В.М. Гвоздь // Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля – 2013. – № 15. – С.63-68.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. Model Code on Fire Engineering.-1-ed.-ECCS, 2011.

80. Домніч І.К. Пожежна безпека кабельної продукції: Навчальний посібник [для студ. вищ. навч. закл.] / І.К. Домніч, Р.І. Кравченко, О.В. Кулаков. – Харків:УЦЗУ. – 2008. – 216 с.

81. Korhonen E.S. Natural fire modeling of large spaces / Helsinki University of Technology. – 2000.

82. Фанера общего назначения. Общие правила классификации по внешнему виду: ГОСТ 30427-96.

83. Куликов В.А. Производство фанеры / В.А. Куликов. – М.: Лесная промышленность. – 1976. – 368 с.

84. Кирилов О.М. Дослідження деяких фізико-механічних властивостей вогнезахисної декоративної фанери / О.М. Кирилов // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість. – 1991. – №4. – С. 36-38.

**85.** Горбаченко Я.В. Дослідження обуглювання вогнезахисних дерев'яних балок при вогневій дії під час пожежі/ Я.В. Горбаченко, С.В. Поздєєв, О.В. Некора, М.О. Кропива // 16 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, 24-25 вересня 2014 р., Київ: тези доп. - Київ: ІДУЦЗ, 2014. – С. 232-233.

86. Защита древесины. Методы определения предпропиточной влажности ГОСТ 20022.14 – 84. Государственный стандарт. – 1984. – 38 с.

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

88. Дьяконов В. П. Mathcad 8/2000: специальный справочник / Дьяконов В. П. – СПб: Изд-во «Питер», 2000. – 592 с.

89. Горбаченко Я.В. Дослідження поведінки дерев'яних балок при впливі пожежі / Я.В. Горбаченко, О.М. Тищенко // Пожежна безпека: теорія і практика: збірник наукових праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2014 – № 17. – С. 4-11.

90. Multi- Residential Timber Framed Construction, Fire Protection for Timber Framing at Door and Window Penetrations// Information Bulletin. – 2000. – No. 4.

91. Горбаченко Я.В. Метод математичного моделювання геометрії обвугленої зони при пожежі дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням / Я.В. Горбаченко // Пожежна безпека: теорія і практика: збірник наукових праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2014 – № 18. – С. 47-54.

92. Горбаченко Я.В. Актуальные вопросы огнестойкости деревянных балок с огнезащитой / Я.В. Горбаченко, С.В. Поздеев // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: VIII Межнар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск: тез. докл. – Минск: КИИ МЧС Республики Беларусь, 2014. – С. 29.

93. Горбаченко Я.В. Залежність швидкості обвуглювання від властивостей вогнезахисту дерев'яних балок / Я.В. Горбаченко, О.В. Некора, О.М. Тищенко // Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Всеукр. наук.-практ. конф. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2015. – С. 97-100.

94. 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.

95. Lie T.T. A method of assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns / Canadian J. of Civil Eng 4:161-169, 2008.

96. Konig J. and Walleig L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2: A design model for standard fire expose// Tratek, Rapport I 0001001. – Stocholm. – June 2000.

97. 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.
98. British Board of Agreement. HEMSEC SIPs- SIP loadbearing wall and roof panels. Agreement certificate 06/4374. Garston: BBA, 2006.
99. British Board of Agreement. Innovare job house building system. Agreement certificate 06/S039. Garston: BBA, 2006.
100. British Board of Agreement. Job house building system. Agreement certificate 05/S037. Garston: BBA, 2006.
101. British Board of Agreement. Build it green- SIP load bearing wall and roof panels. Agreement certificate 06/4389. Garston: BBA, 2007.
102. British Board of Agreement. SIP Building Systems- SIP load bearing wall and roof panels. Agreement certificate 06/4312. Garston: BBA, 2007.
103. White Robert H. Fire Performance of Hardwood Species: Paper prepared for presentation at 11th IUFRO World Congress(2000, August 7-12, Kuala Lumpur, Malaysia). – 2000. – 13p.
104. Silcock G.W.H. and Shields T.G. Relating Char to Fire Severity Conditions/ Fire and Materials, 25, 9-11, 2001.
105. Бут В.П. Особливості дослідження тривалості вогнезахисту деревини просочувальними засобами / В.П. Бут, В.М. Жартовський, М.В. Білощицький, Ю.В. Цапко, О.Г. Барило // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2004. – № 1 (9). – С. 21 – 25.
106. Коздоба Л.А. Методы решения обратных задач теплопереноса / Л.А. Коздоба, П.Г. Круковский. – К.: Наукова думка, 1982. – 360 с.
107. Collier P.C.R. and Buchanan A.H. Fire Resistance of Light-weight Timber Framed Walls/ Fire Technology, 38, 125-145, 2002.
108. Цапко Ю.В. Перспективи підвищення ефективності вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів / Ю.В. Цапко // Зб. наук. праць ЛДУБЖД. – 2006. – Вип. 8. – С. 206-210.
109. Цапко Ю.В. Сучасні підходи до визначення ефективності

вогнезахищеної деревини / Ю.В. Цапко, О.Д. Гудович, К.І. Соколенко // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи: VII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників, Київ: тез. доп. – Київ: ІДУЦЗ, 2005. – С. 360-362.

110. Gribniak V. Numerical simulation strategy of reinforced concrete tunnel bearing members in fire / V. Gribniak, D. Bacinskas, G. Kaklauskas // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2006, 1 (1), p. 5–9.

111. 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.

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

113. Krakovský A.; Kral Š.: The influence of thermo mechanical loading on behavior of spruce wood. Technical University in Zvolen. – 2008 (in Polish).

114. British Standards Institution, BS 6399-1: 1996, Loading for buildings – Part 1: Code of practice for dead and imposed loads, BSI, London, 2002

115. Сахаров В.С. Метод конечных элементов в механике твердого тела / В.С. Сахаров, В.Н. Кислокий, В.Р. Киричевский. – К.: Вища школа. – 1982. – 480 с.

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

117. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности : в 2-х т. / Ю. М. Мацевитый. – К.: Наукова думка. – 2002. – Т. 1: Методология. – 2002. – 408 с.

118. 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.

**119.** Горбаченко Я.В. Геометрія зони обвуглювання у перерізах

вогнезахищених дерев'яних балок в умовах пожежі / Я.В. Горбаченко, С.В. Поздєєв, О.В. Некора, І.В. Федченко // Проблеми пожежної безпеки. – 2015. – Вип. 37. – С. 168-177.

120. Thoeman H and Humphrey P E, Modelling of the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites: Part 1 – Heat and mass transfer. Holz Roh Werkst, 64(1), pp. 1-10, 2006.

121. Harmathy T Z, Properties of building materials – Section 1 Chapter 26, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA, Boston, pp.388-391, 2007.

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

123. Жартовський В.М. Проблемні питання щодо експлуатації вогнезахищеної деревини / В.М. Жартовський, Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко // Живучість корабля и безопасность на море: III Междунар. науч-техн. конф., Севастополь: тези докл. – Севастополь: СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2005. – С. 23-24.

124. Жартовський В.М. Вимоги до експлуатаційних властивостей деревини просоченої вогнезахисними засобами / В.М. Жартовський, Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко // Зб. наук. праць Севастопольського військово-морського інституту ім. П.С. Нахімова. – 2005. – Вип. 1(7). – С. 231-235.

125. Дослідження токсичності продуктів горіння вогнезахищеної деревини. / В.М. Жартовський Ю.В Цапко., О.Д. Гудович, К.І. Соколенко // Коммунальное хозяйство. – 2005. – Вип.63. – С. 320-326.

126. Жартовський В.М. Пожежна профілактика целюлозовмісних матеріалів / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський // Зб. наук. праць ЛДУБЖД. – 2006. – Вип. 9. – С. 72-76.

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

**128.** Горбаченко Я.В. Исследования поведения деревянных балок с огнезащитой при пожаре / Я.В. Горбаченко, С.В. Поздеев, О.В. Некора, М.А. Кропива // Весник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – Минск: КИИ, 2015. – №2 (22). – С. 12-19.

129. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука. – 1965. – 512 с.

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



## **ДОДАТКИ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор  
ТОВ «А.М. Союз»  
Недашківський М. В.  
17 24 2015р.

## АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Горбаченко Я.В.  
«Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості  
дерев'яних балок із вогнегасним просоченням»

Комісія в складі: голова – заступник директора Нечасенко О.П.,; члени комісії – начальник кафедри пожежно-профілактичної роботи ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, к.т.н., доц. Цвіркун С.В., доцент кафедри будівельних конструкцій ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, к.т.н., с.н.с. Мельник О.Г., викладач кафедри процесів горіння ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ к.т.н. Нуязін О.М. провели визначення межі вогнестійкості дерев'яних балок на основі даних, отриманих за допомогою розрахункового методу.

1. Предмет дослідження. дерев'яна балка розмірами 50×65×400 мм, клеєна фанера розмірами 400×400 мм та товщиною 16 мм.

2. Мета дослідження.

Практичне визначення ефективності запропонованого методу на основі врахування конфігурації зони обвуглювання дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням за стандартним температурним режимом і під час її випробування на вогнестійкість за удосконаленим методом.

3. Методична база досліджень.

3.1. Дослідження проводилися з використанням методу інтерполяції температурного поля за температурами у контрольних точках перерізу дерев'яних балок, отриманих розрахунковим шляхом.

3.2. Граничні умови та навантаження відповідали розрахунковій схемі будівлі з врахуванням технологічної історії їх прикладання.

3.3. Проведення розрахунків здійснювалося за допомогою програмного забезпечення.

4. Результати випробувань

4.1. Дослідження проведені 11 лютого 2015 року в повному обсязі згідно з встановленою методикою.

4.2. Встановлена межа вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним просоченням, яка склала 33 хв.

4.3. Дані, отримані в результаті експерименту та розрахунку, не суперечать відомим даним вогневих випробувань, при тому що запропонований до впровадження метод має меншу вартість та трудомісткість за експериментальні методи.

#### 5 Висновки та пропозиції

Результати випробувань показали, що розроблена методична база розрахункового методу підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнегасним просоченням може бути впроваджена у діяльність для комплексного дослідження пожежної безпеки будівель.

Голова комісії:  
Заступник директора ТОВ «А.М. Союз».



О. П. Нечаєнко

Члени комісії:



С. В. Цвіркун

О. Г. Мельник

О. М. Нуянзін

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ПАТ «Черкаська меблева  
фабрика»

П.М. Маковський



## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Горбаченко Яни Василівни «Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнегасним просоченням»

Комісія в складі: голови комісії – начальника виробничої лабораторії Кузьменко І.С., членів комісії – заступника начальника виробничої лабораторії Грижук В.А., доцента кафедри будівельних конструкцій Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України к.т.н., доцента Ступака Д.О. склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень Горбаченко Я.В. апробовані та впроваджені у роботу ПАТ «Черкаська меблева фабрика».

В результаті проведених дисертаційних досліджень Горбаченко Я.В. розроблено та запропоновано розрахунковий метод оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням. Врахування запропонованих нововведень дозволило значно підвищити межу вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням за рахунок врахування конфігурації зони обвуглювання, та зменшення вартості проведення випробувань, обсягу робіт з підготовки, проведення та обробки результатів випробувань.

Розроблена методика була апробована при проведенні випробувань дерев'яних балок розмірами 50×65×400 мм, клеєна фанера розмірами 400×400 мм та товщиною 16 мм. У результаті розрахунку визначена межа вогнестійкості що склала 6.2 хв. У порівнянні з результатами розрахунку похибка результатів, що отримані за методом, описаним у другій частині Eurocode 5, відповідно для балок без вогнезахисту із I, II та III типом вогнезахисного просочення склала 11,4 %, 74,2 %, 78,6 % та 80 %. Проведений аналіз отриманих даних показав ефективність розробленого методу.

Результати дисертаційних досліджень Горбаченко Я. В. можна використовувати при розробці та удосконаленні нормативно-технічної бази, яка регламентує технічні умови проведення випробувань на вогнестійкість дерев'яних балок.

Голова комісії:



І. С. Кузьменко

Члени комісії:



В. А. Грижук



Д. О. Ступак

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В. о проректора Національного  
університету – начальника Черкаського  
інституту пожежної безпеки  
імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України  
кандидат технічних наук, професор

О. М. Тищенко  
« 31 » 2015 р.


**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Горбаченко Я. В. у навчальний процес

Комісія у складі: професора кафедри організації техногенно-профілактичної роботи доктора технічних наук, с.н.с. Кириченко О. В., начальника кафедри будівельних конструкцій кандидата технічних наук, доцента Отроша Ю. А., начальника кафедри пожежно-профілактичної роботи кандидата технічних наук, доцента Цвіркуна С. В., склали акт про те, що результати дисертаційної роботи Горбаченко Я. В.:

– розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок із вогнегасним просоченням;

– методика випробування дерев'яних балок на вогнестійкість та їх інтерпретація;

– способи інтерполяції температурних полів у перерізах дерев'яних балок впроваджені в 2015/16 навчальному році в Черкаському інституті пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України у навчальний процес (дисципліна – «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі», тема «Дерев'яні конструкції», «Пожежна профілактика в населених пунктах», тема «Визначення ступенів вогнестійкості будівель») у лекційній та практичній заняття.

Використання розробленого розрахункового методу під час проведення лекцій та практичних занять істотно підвищило наочність навчання, а також дозволило скоротити час на вивчення поведінки дерев'яних балок, що у свою чергу дозволило забезпечити можливість вивчення курсантами сучасних підходів щодо розв'язання даних задач.

Голова комісії

Члени комісії



О. В. Кириченко

Ю. А. Отрош

С. В. Цвіркун