

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Змага Микола Іванович

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ
ЗДАТНОСТІ ВОГНЕСТІЙКОЇ ФАНЕРИ ДЛЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК**

Спеціальність – 261 Пожежна безпека
Галузь знань – 26 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ М.І. Змага

Науковий керівник: **Сідней Станіслав Олександрович**
кандидат технічних наук
Кобко Василь Андрійович
кандидат історичних наук

Черкаси – 2022

АНОТАЦІЯ

Змага М.І. Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, 2022.

Актуальність теми.

Щороку в Україні, виникає велика кількість пожеж і прослідковується тенденція до збільшення їх кількості у будівлях з використанням дерев'яних несучих конструкцій. Найбільш розповсюдженими несучими конструкціями даних будівель є дерев'яні балки. Оскільки в усьому світі використовується не цільна, а клеєна деревина і все частіше використовуються продукти деревини у вигляді фанери та OSB плити, дослідження цих матеріалів стає дедалі актуальнішим. Зважаючи на той факт, що Державні будівельні норми України корелюються з Єврокодами, виникає необхідність створення нормативно-правової бази міжнародного стандарту.

Через обвуглювання дерев'яних балок у результаті дії високих температур при пожежі зменшується їх робочий переріз, в результаті чого, збільшується напруження в конструкції, робоче навантаження на несучу конструкцію стає більшим за нормативне, як наслідок при досягненні межі міцності деревини виконуються умови втрати несучої здатності і конструкція руйнується. Тому для досягнення нормативної межі вогнестійкості дерев'яних констукцій їх необхідно піддавати вогнезахисному оброблянню, або облицюванню.

Ідея роботи полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання – розробка розрахункового методу оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок, залежно від закономірностей зміни геометричних параметрів зони обвуглювання та з урахуванням впливу стандартного температурного режиму пожежі, як наукового підґрунтя для

доповнення існуючої нормативної бази щодо визначення межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що в свою чергу дозволяє забезпечувати вимоги пожежної безпеки до будівель із дерев'яними балками даного типу вогнезахисту.

Останнім часом все більш широкого поширення в будівництві набувають клеєні дерев'яні конструкції і деталі з деревини у вигляді балок прямокутного перерізу. Проте, досягнення негорючості і важкогорючості, низької димоутворювальної здатності таких дерев'яних конструкції залишається актуальним завданням.

Ефективним засобом забезпечення проектної вогнестійкості дерев'яних конструкцій залишається застосування вогнезахисного облицювання. Перспективним матеріалом є вогнезахисне облицювання на основі просоченої фанери, що зберігає свою актуальність у застосуванні не тільки на автомобільному, залізничному, авіатранспорті, суднобудуванні, а і під час будівництва висотних будівель, які мають підвищений рівень небезпеки. Тому, для забезпечення нормованої межі вогнестійкості дерев'яної балки, було застосовано вогнезахисне облицювання на основі просоченої фанери.

Об'єкт роботи – методи розрахункового оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок прямокутного перерізу.

Предметом дослідження є вплив конструктивних параметрів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та часу впливу стандартного температурного режиму пожежі на їх вогнестійкість.

Мета проведення досліджень в даній роботі полягає у розкритті закономірностей залежності конфігурації зони обвуглювання дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери від конструктивних параметрів несучої конструкції та часу експонування за стандартним температурним режимом, що є підґрунтям для створення ієрархії методів з метою прогнозування поведінки дерев'яних балок такого типу, як частини сучасної нормативної бази щодо забезпечення пожежної безпеки будівель із дерев'яними конструкціями.

Для досягнення поставлених цілей були сформовані такі завдання:

- провести аналіз статистичних даних щодо пожеж в Україні за останні роки, а також аналіз вимог нормативної бази України щодо вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними системами та без них;

- розробити методика експериментальних досліджень на основі вогневих випробувань фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом часу в межах діапазону стандартних класів вогнестійкості для даного типу балок;

- на основі проведених експериментальних досліджень розробити методика інтерполяцій обвугленої зони в перерізах дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери із використанням узагальненого математичного опису за допомогою ліній Без'є;

- дослідити закономірності залежності геометричних параметрів обвугленої зони та межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери від конструктивних параметрів балок та часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі;

- розробити ієрархічну систему методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок, облицьованих вогнезахисною фанерою, на основі створених довідникових таблиць, номограм та математичного опису геометрії обвугленої зони цих балок.

Наукова новизна дисертації полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо розкриття закономірностей залежності геометричних характеристик обвугленої зони та межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу, захищених вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, від їх конструктивних параметрів та часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі, що дозволяє суттєво розширити номенклатуру вогнезахисних матеріалів для забезпечення пожежної безпеки дерев'яних балок.

При цьому отримані такі основні наукові результати:

- вперше запропоновано метод описання обвугленої зони в перерізах дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що дозволяє встановлювати належність дерев'яних балок із вогнезахистом даного типу до того чи іншого класу вогнестійкості;

- визначено торцеву та бічну швидкості обвуглювання дерев'яних балок із вогнезахистом на основі просоченої фанери, що склали відповідно 0.96 мм/хв та 0.31 мм/хв, а також час затримки початку обвуглювання, що складає в залежності від товщини облицювання від 11 хв до 20 хв на торці перерізу та від 15 хв до 25 хв на бічній стороні перерізу, що використовується як частина початкових даних для реалізації розробленого методу оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисного облицювання для дерев'яних балок;

- встановлено закономірність залежності вогнестійкості від найбільш значущих параметрів: відношення площі обігрівної поверхні балки до її об'єму (A_b/V), товщини облицювання (d), коефіцієнту навантаження (μ_{fi}) що має вигляд:

$$U_{fi} = 286.99 - 5914.7 \cdot A_b/V - 2.57 d - 196.99 \mu_{fi} + 206.25 \cdot A_b/V d + 170.45 \cdot A_b/V \mu_{fi} + 0.261 d \mu_{fi} - 17.045 \cdot A_b/V d \mu_{fi};$$

- запропоновано ієрархічну систему методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок різної конфігурації, що захищені вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, за допомогою створених довідникових таблиць, номограм та запропонованого алгоритму реалізації уточненого методу оцінювання класу вогнестійкості даних конструкцій, що є основою визначення кінцевих елементів для оцінки межі вогнестійкості із врахуванням реальної конфігурації обвугленої зони балки;

- набуло подальшого розвитку використання системи методів оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисними системами на основі просоченої фанери;

- удосконалено експериментальну та розрахункову базу забезпечення необхідних вимог щодо вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням.

Практичне значення отриманих результатів та впровадження результатів роботи полягає у розробленні методу підвищеної точності для розрахунку і оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок, захищених шляхом облицювання вогнезахисною фанерою, за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Даний метод та існуюча база методів визначення глибини обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням дозволяє спрогнозувати точну геометричну конфігурацію не обвугленої частини балки та визначити її реальну несучу здатність. Відповідно до цього можна вибудувати ієрархію системи методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок захищених шляхом вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери, звертаючись до створених довідникових таблиць, номограм та математичного опису геометрії обвугленої зони цих балок. Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок може бути використаний для удосконалення і доповнення існуючої нормативно-правової бази України.

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані у новому технічному рішенні – вогнезахисний спосіб на основі просоченої фанери, що захищено патентом на корисну модель України №143304.

Розроблено та запропоновано розрахунковий метод оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що дозволяє доповнити нормативно правову базу з урахуванням запропонованих нововведень, які дозволяють значно підвищити межу вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням вогнезахисною фанерою за рахунок врахування конфігурації зони обвуглювання та зменшення вартості проведення випробувань і обсягу робіт. Результати виконаних досліджень впроваджено у діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту під час виконання науково дослідних робіт та розробки нормативно-правових актів (м. Київ).

Теоретичні і практичні результати отримані у дисертаційному дослідженні, зокрема, результати досліджень обвуглювання дерев'яних балок із різними вогнезахисними системами, глибини обвуглювання зразків фрагментів дерев'яних балок, що облицьовані вогнезахисною фанерою та положення «Методики оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери» завдяки яким інженери та науковці, які працюють у цій галузі, матимуть можливість підвищити якість та ефективність випробувальних робіт під час оцінювання параметрів вогнестійкості несучих та огорожувальних конструкцій з деревини. Результати виконаних досліджень прийнято до впровадження у Випробувальному центрі ТОВ «ТЕСТ» (м.Київ).

Теоретичні та практичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні впроваджені в освітній процес на кафедрі безпеки об'єктів будівництва та охорони праці Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, при підготовці фахівців освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» при викладанні дисципліни «Стійкість будівель і споруд при пожежі» в розділі теми «Способи підвищення вогнестійкості дерев'яних конструкцій». Також при підготовці фахівців освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» при викладанні дисципліни «Стійкість будівель та споруд в умовах надзвичайних ситуацій» в розділі таких тем «Визначення вогнестійкості дерев'яних конструкцій» та «Вогнестійкість дерев'яних конструкцій та способи її підвищення».

Методи дослідження. Для розроблення методики розрахунку застосовувалися експериментальні, табличні і теплофізичні методи дослідження температурних розподілів всередині перерізу дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та для побудови ліній контурів зони обвуглювання, доповненням яких було математичне моделювання. Для перевірки достовірності та адекватності отриманих результатів експерименту та математичного описання зони обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисним

облицюванням на основі просоченої фанери застосовувалися методи математичної статистики.

У вступі наведена загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми досліджень, розкритий зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульована мета, завдання, об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, визначений особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію, публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі було проаналізовано нормативну базу та наукові розробки для визначення меж вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням, проведено моніторинг статистичних даних щодо пожеж, які виникли на території держави.

Завдяки проведеному аналізу виявлено, що швидкому поширенню вогню сприяє використання незахищених дерев'яних конструкцій, а це відповідно призводить до більшої кількості жертв при пожежі. Для забезпечення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій у відповідності з вимогами чинних будівельних норм України пріоритетними являються питання методик, які надають можливість прогнозувати та оцінювати вогнестійкість конструкцій для будівель, що проектуються, а також для вже збудованих об'єктів. На основі прогнозованих даних застосовуються технологічні способи з метою підвищення вогнестійкості конструкцій будівлі та зменшення значення межі поширення полум'я. До основних технологічних систем, що використовуються з даною метою, належить також і вогнезахисне облицювання, а з огляду на ряд переваг дані технології становлять значний інтерес. Слід зазначити, що вплив облицювання на основі просоченої фанери на вогнестійкість дерев'яних балок вивчений недостатньо. Зазначені обставини, що входять в систему стандартів і являються чинними в Україні (EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2), вплинули на систему розрахункових методів оцінювання вогнестійкості дерев'яних конструкцій.

Результати аналізу літературних джерел і патентного огляду дали можливість сформулювати мету та завдання для її досягнення.

У другому розділі сформовано номенклатуру зразків фрагментів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням просоченою фанерою та без нього для проведення вогневих випробувань з метою дослідження їх поведінки за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Описано експериментальне обладнання та матеріали для виготовлення зразків-фрагментів дерев'яних балок.

Описана методика виготовлення зразків-фрагментів дерев'яних балок захищених шляхом облицювання просоченою фанерою, з обґрунтуванням їх конструктивних параметрів та кількості, що забезпечує достовірність випробувань.

Описана методика досліджень поведінки випробувальних зразків-фрагментів дерев'яних балок не захищених та захищених шляхом їх вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери.

У третьому розділі проведено дослідження закономірностей зміни температури у внутрішніх шарах зразків-фрагментів дерев'яних балок облицюваних вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що залежить від часу випробування в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

Виявлено закономірності зміни торцевої та бокової глибини обвуглювання експериментальних зразків у залежності від часу їх експонування за стандартним температурним режимом пожежі та встановлено відповідні регресійні залежності, що описуються за допомогою коефіцієнтів регресії типу $d(t) = b_1 + b_2 t + b_3 t^2 + b_4 t^3$.

Встановлено швидкості обвуглювання бічної і торцевої сторін перерізу зразків-фрагментів дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисною фанерою залежно від часу їх експонування в умовах стандартного температурного режиму пожежі, що відповідно становлять 0,31 мм/хв та 0,96 мм/хв.

Також встановлено час затримки початку обвуглювання дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням, що складає, в залежності від товщини

облицювання, від 11 хв до 20 хв з торцевої сторони перерізу та від 15 хв до 25 хв з бічної сторони перерізу.

Виявлено закономірності температурних розподілів у різних часових інтервалах вогневого впливу за стандартним температурним режимом, що становлять 15 хв, 30 хв, 60 хв для зразків-фрагментів дерев'яних балок з товщиною облицювання вогнезахисною фанерою в діапазоні від 0 мм до 20 мм. При 60 хв вогневих випробуваннях температурні показники першої термопари склали для зразків з товщиною захисту 0 мм – 599 °С, 10 мм – 248 °С, 20 мм – 219 °С, що підтверджує залежність глибини обвуглювання від товщини вогнезахисного облицювання.

Проаналізовані результати експериментів щодо процесу нагрівання та обвуглювання захищених дерев'яних балок шляхом облицювання вогнезахисною фанерою та не захищених дерев'яних балок, що визначає адекватність отриманих результатів.

У четвертому розділі дисертації описано математичну модель прогнозування геометричної форми перерізу вогнезахисних дерев'яних балок в умовах пожежі. Використовуючи розроблений математичний апарат, були побудовані контури обвугленої зони для різних дерев'яних балок без вогнезахисту та з вогнезахисним облицюванням різної товщини. Відповідно визначених параметрів t_{0s} та t_{0e} – час затримки процесу обвуглювання на бічній та торцевій стороні перерізу дерев'яної балки. Час затримки процесу обвуглювання на сторонах перерізу балки визначається за узагальненими експериментальними даними, наведеними у попередньому розділі даної роботи. Дані розрахунки були проведені для визначення конфігурації ліній Без'є, що можуть бути визначені за допомогою 5-ти характерних точок, які зафіксовані на ізотермах із критичною температурою. Параметризація функцій кривих Без'є базується на припущенні, що параметр r визначається за найбільшим габаритним розміром перерізу балки у безрозмірному відносному представленні у вигляді параметричної функції $r = f(y_c/h)$. Такий запис потрібний для опису перерізів з іншими габаритними розмірами, та різними їх співвідношеннями. Для того, щоб проаналізувати

величину імовірної похибки при моделюванні обвугленої зони перерізу дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього за запропонованим нами методом, був використаний метод збурень. Результати проведених розрахунків за даними параметрами із «збуренням» порівнюються із результатами, отриманими за початковими даними без «збурення». Такий порівняльний аналіз дозволяє оцінити достовірність методу з огляду на чутливість його похибки до експериментальної похибки проведених дослідів, що складає не більше 14 % та вкладається у ієрархічну схему методів рекомендованих нормативними документами.

У п'ятому розділі застосовувався метод прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі. З урахуванням результатів, отриманих у попередньому розділі, було запропоновано послідовність процедур для розрахункового методу прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі із стандартним температурним режимом, який ґрунтується на спрощених алгоритмах. Одним із таких алгоритмів є використання спеціальних номограм. Вказані номограми можуть бути побудовані на основі отриманої регресії наявних даних щодо товщин вогнезахисного покриття на основі просоченої фанери для дерев'яних балок прямокутного перерізу при забезпеченні стандартних класів вогнестійкості. Таким чином, отримані результати дозволяють визначити послідовність процедур для реалізації методики прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі із стандартним температурним режимом. Також запропоновано послідовність процедур при застосуванні даного методу.

Завдяки проведеним дослідженням було обґрунтовано та запропоновано розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок. Шляхом математичного моделювання, номограм та таблиць для оцінки класу вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням

на основі просоченої фанери побудовано ієрархію методів, які дозволяють спрогнозувати точну геометричну конфігурацію необвугленої частини перерізу дерев'яної балки та визначити її реальну несучу здатність.

Ключові слова: вогнезахист деревини, вогнезахисне облицювання, вогнестійкість, пожежа, вогнестійка фанера, стандартний температурний режим, обвуглена зона, математична модель, експеримент, клас вогнестійкості.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire-protected wood, taking into account its humidity. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. Том 3, № 2. С. 106-115.

2. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y., Fragmentary illumination of results of fire test of wooden beams with facing by fire-retardant plywood *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Том 4, № 1. С. 91 – 96. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.1.-91-96>

3. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Том 4, № 2. С. 97 – 105. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105>

4. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Fedchenko S., Zmaha Y. Physico-chemical properties of fire-protective plywood under high temperatures. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. ТОМ 5 № 1. С. 129-132. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.129.132>

5. Zmaha M. Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні*

ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. Том 5 № 2. С. 125-135. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135>.

6. С. Сідней, В. Кобко, С. Федченко, М. Змага, Н. Заїка. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. Том 6 № 1. С. 95-103. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>

Статті у наукових виданнях, що входять до бази даних Scopus:

7. Zmaha M., Pozdieiev S., Nekora O., Zmaha Y., Sidnei S. Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading *International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020)*. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2020. Volume 1021. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012031/pdf>.

Монографія:

8. Змага М. І., Змага Я. В., Некора О. В., Поздєєв С. В., Федченко С. М., Швиденко А. В. Методика оцінка вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням. *Монографія*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019 – 125 с.

Патент на корисну модель:

9. Поздєєв С. В., Некора О. В., Змага М. І., Змага Я. В., Новгородченко А. Ю. Вогнезахисний спосіб на основі просоченої фанери. *Патент на корисну модель № 143304*, опубліковано 27.07.2020 року, бюлетень № 14.

Статті у наукових виданнях України, що додатково висвітлюють дисертаційні дослідження:

10. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y., Novgorotcenko A. Investigation of carbonization of wood beams with different fire protection systems. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. Том 3, № 1. С. 87-92.

Матеріали науково-практичних конференцій, що засвідчують апробацію дисертації:

1. Поздєєв С. В., Змага М. І., Новгородченко А. Ю., Змага Я. В. Дослідження обвуглювання дерев'яних балок із різними вогнезахисними системами *Матеріали 8-ї міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Частина 2. С. 190-191.

2. Змага М. І., Змага Я. В. Опис фрагмента зразка дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисної фанери *Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 150-152.

3. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Дослідження обвуглювання вогнезахисних дерев'яних балок. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика»*. Харків: НУЦЗ України, 2019. С. 289-290.

4. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Дослідження глибини обвуглювання зразків фрагментів дерев'яних балок, облицьованих вогнезахисною фанерою. *Матеріали ХІ Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»* Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 198 – 200.

5. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Результати випробувань зразків фрагментів дерев'яних балок за стандартним температурним режимом. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗ України, 2020. – С. 132-133.

6. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire prtected wood. *Матеріали Х Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. – С. 256-258.

7. Поздєєв С. В., Змага М. І., Некора О. В., Змага Я. В., Сідней С. О. Дослідження можливостей забезпечення вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням з просоченої фанери. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність на транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 96-98.

8. Zmaha M., Zmaha Y. Analysis of fire protection cladding methods for wooden beams. *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «The world of science and innovation»*. London: Cognum Publishing House, 2021. – P. 159-1634.

9. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Натурні випробування фрагменту-зразка дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисною фанерою. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 212-214.

10. А. В. Субота, М. І. Змага, О. В. Некора, Я. В. Змага, Є. О. Тищенко. Результати експериментальне досліджень параметрів регресійних залежностей товщини обвуглювання. *Матеріали 9-ої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»* Харків, 17-19 листопада 2021 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2021, 176-178 с.

11. Zmaha Y., Zmaha M. Calculating the fire resistance of exposed wood members. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 188 - 189.

12. Поздєєв С. В., Субота А. В., Змага М. І., Змага Я. В. Методи прогнозування несучої здатності в умовах пожежі дерев'яних балок прямокутного перерізу. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків, 19 травня 2022 р.: Тези доповідей НУЦЗ України, 2022. С. 16-17.

ANNOTATION

Zmaha M.I. Calculation method for evaluating the fire-resistant ability of fire-resistant plywood for wooden beams. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 261 – Fire safety. – Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the Ukrainian National Center for Fire Safety, Cherkasy, 2022.

Actuality of theme.

Every year in Ukraine, a large number of fires occur and the tendency to increase their number in buildings with the use of wooden load-bearing structures is followed. The most common bearing structures of these buildings are wooden beams. Since glued wood is used all over the world, and wood products in the form of plywood and OSB are increasingly used, the study of these materials is becoming more and more relevant. Considering the fact that the State Building Regulations of Ukraine are correlated with the Eurocodes, there is a need to create a legal framework of an international standard.

Due to the charring of wooden beams as a result of the action of high temperatures during a fire, their working cross-section decreases, as a result, the stress in the structure increases, the working load on the load-bearing structure becomes greater than the normative one, as a result, when the strength limit of wood is reached, the conditions for the loss of bearing capacity are met and the structure is collapsing. Therefore, in order to achieve the normative limit of fire resistance of wooden constructions, they must be subjected to fire-resistant treatment or cladding.

The idea of the work is to solve an actual scientific and technical task – the development of a calculation method for evaluating the fire-resistant ability of fire-resistant plywood for wooden beams, depending on the laws of changing the geometric parameters of the carbonization zone and taking into account the influence of the standard fire temperature regime, as a scientific basis for supplementing the existing regulatory framework regarding the determination of the fire resistance limit of wooden beams with fire-resistant cladding based on impregnated plywood, which in turn allows

to ensure fire safety requirements for buildings with wooden beams of this type of fire protection.

Recently, glued wooden structures and wooden parts in the form of beams of rectangular cross-section are becoming more and more widespread in construction. However, achieving non-flammability and low flammability, low smoke-generating capacity of such wooden structures remains an urgent task.

The use of fire-resistant cladding remains an effective means of ensuring the design fire resistance of wooden structures. A promising material is fire-resistant cladding based on impregnated plywood, which retains its relevance in application not only in automobile, railway, air transport, shipbuilding, but also during the construction of high-rise buildings that have an increased level of danger. Therefore, to ensure the standard limit of fire resistance of a wooden beam, a fire-resistant cladding based on impregnated plywood was applied.

The object of the work methods of calculating the fire-resistant ability of fire-resistant plywood for wooden beams of rectangular cross-section.

The subject of the study is the influence of structural parameters of wooden beams with fire-resistant cladding based on impregnated plywood and the time of exposure to the standard fire temperature regime on their fire resistance.

The purpose of the research in this paper is to reveal the regularities of the dependence of the carbonization zone configuration of wooden beams of rectangular cross-section with fire-resistant cladding based on impregnated plywood on the structural parameters of the supporting structure and the exposure time according to the standard temperature regime, which is the basis for creating a hierarchy of methods for the purpose of forecasting behavior of wooden beams of this type as part of the modern regulatory framework for ensuring fire safety of buildings with wooden structures.

To achieve the set goals, the following tasks were formed:

- to conduct an analysis of statistical data on fires in Ukraine in recent years, as well as an analysis of the requirements of the regulatory framework of Ukraine regarding the fire resistance of wooden beams with and without fire protection systems;

- to develop a method of experimental research based on fire tests of fragments of wooden beams with and without fire-resistant cladding based on impregnated plywood under the conditions of thermal exposure of the standard fire temperature regime over time within the range of standard fire resistance classes for this type of beams;

- on the basis of the conducted experimental studies, develop a method of interpolation of the charred zone in the cross-sections of wooden beams with fire-resistant cladding on the basis of impregnated plywood using a generalized mathematical description using Bezier lines;

- to investigate the regularities of the dependence of the geometric parameters of the charred zone and the fire resistance limit of wooden beams of rectangular section with fire-resistant cladding based on impregnated plywood on the structural parameters of the beams and the time of thermal exposure to the standard fire temperature regime;

- to develop a hierarchical system of methods for calculating the fire resistance of wooden beams lined with fire-resistant plywood, based on created reference tables, nomograms and a mathematical description of the geometry of the charred zone of these beams.

The scientific novelty of the dissertation consists in the solution of the current scientific and technical task of revealing the regularities of the dependence of the geometric characteristics of the charred zone and the fire resistance limit of wooden beams of rectangular section, protected by fire-resistant cladding based on impregnated plywood, on their structural parameters and the time of thermal exposure to the standard fire temperature regime. which allows you to significantly expand the range of fire-resistant materials to ensure the fire safety of wooden beams.

At the same time, the following main scientific results were obtained:

- for the first time, a method of describing the charred zone in cross-sections of wooden beams with fire-resistant cladding based on impregnated plywood was proposed, which makes it possible to establish whether wooden beams with fire protection of this type belong to one or another class of fire resistance;

- the end and side charring speeds of wooden beams with fire protection on the basis of impregnated plywood were determined, which were 0.96 mm/min and 0.31 mm/min, respectively, as well as the delay time for the beginning of charring, which, depending on the thickness of the cladding, was from 11 min to 20 min on the end of the section and from 15 min to 25 min on the side of the section, which is used as part of the initial data for the implementation of the developed method for evaluating the fire-resistant ability of fire-resistant cladding for wooden beams;

- the regularity of the dependence of fire resistance on the most significant parameters was established: the ratio of the area of the heating surface of the beam to its volume (A_b/V), the thickness of the lining (d), the load factor (m_{fi}), which has the following form: $U_{fi} = 286.99 - 5914.7 \cdot A_b/V - 2.57 d - 196.99 \mu_{fi} + 206.25 \cdot A_b/V d + 170.45 \cdot A_b/V \mu_{fi} + 0.261 d \mu_{fi} - 17.045 \cdot A_b/V d \mu_{fi}$;

- a hierarchical system of methods for calculating the fire resistance of wooden beams of various configurations, protected by fire-resistant cladding based on impregnated plywood, is proposed using the created reference tables, nomograms and the proposed algorithm for implementing a refined method for assessing the fire resistance class of these structures, which is the basis for determining the end elements for estimates of the fire resistance limit taking into account the real configuration of the charred zone of the beam;

- the use of a system of methods for assessing the fire resistance of wooden beams with fire protection systems based on impregnated plywood has gained further development;

- the experimental and calculation basis for ensuring the necessary requirements for fire resistance of wooden beams of rectangular cross-section with fire-resistant cladding has been improved.

The practical significance of the obtained results and the implementation of the results of the work consists in the development of a method of increased accuracy for calculating and evaluating the fire-resistant ability of fire-resistant plywood for wooden beams protected by cladding with fire-resistant plywood, under the conditions of exposure to the standard fire temperature regime. This method and the existing

database of methods for determining the depth of carbonization of wooden beams with fire-resistant cladding allows you to predict the exact geometric configuration of the non-carbonized part of the beam and determine its real load-bearing capacity. In accordance with this, it is possible to build a hierarchy of methods for calculating the fire resistance of wooden beams protected by fire-resistant cladding based on impregnated plywood, referring to the created reference tables, nomograms and mathematical description of the geometry of the charred zone of these beams. The calculation method for evaluating the fire-resistant ability of fire-resistant plywood for wooden beams can be used to improve and supplement the existing regulatory and legal framework of Ukraine.

A calculation method for estimating the fire resistance limit of wooden beams of rectangular cross-section with fire-resistant cladding based on impregnated plywood has been developed and proposed, which allows to supplement the regulatory legal framework taking into account the proposed innovations, which allow to significantly increase the fire resistance limit of wooden beams with fire-resistant cladding with fire-resistant plywood at the expense of taking into account the configuration of the carbonization zone and reducing the cost of conducting tests and the scope of work. The results of the conducted researches are implemented in the activities of the Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection during the implementation of scientific research works and the development of normative and legal acts (Kyiv).

The theoretical and practical results obtained in the dissertation research were implemented in the educational process at the Department of Safety of Construction Facilities and Occupational Safety of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the Ukrainian National Center for Fire Safety, in the preparation of specialists with a bachelor's degree in the specialty 261 "Fire Safety" in teaching discipline "Resistance of buildings and structures in case of fire" in the section of the topic "Methods of increasing the fire resistance of wooden structures". Also, in the preparation of specialists with a bachelor's degree in the specialty 263 "Civil safety" when teaching the discipline "Resistance of buildings and structures in emergency

situations" in the section of such topics as "Determining the fire resistance of wooden structures" and "Fire resistance of wooden structures and methods its increase".

Research methods. To develop the calculation methodology, experimental, tabular and thermophysical methods were used to study temperature distributions inside the cross-section of a wooden beam with fire-resistant cladding based on impregnated plywood and to construct contour lines of the charring zone, which were supplemented by mathematical modeling. Mathematical statistics methods were used to check the reliability and adequacy of the obtained experimental results and the mathematical description of the carbonization zone of wooden beams with fire-resistant cladding based on impregnated plywood.

In the introduction, the general characteristics of the work are given, the relevance of the research topic is substantiated, the connection of the work with scientific programs, plans and topics is revealed, the goal, task, object and subject of the research are formulated, the scientific novelty and practical significance of the obtained results are indicated, the personal contribution of the recipient is determined, given data on approval, publications, structure and scope of work.

In the first chapter, the regulatory framework and scientific developments for determining the limits of fire resistance of wooden beams with fire-resistant cladding were analyzed, and statistical data on fires that occurred on the territory of the state were monitored.

Thanks to the conducted analysis, it was found that the rapid spread of fire is facilitated by the use of unprotected wooden structures, which, accordingly, leads to a greater number of victims in the event of a fire. In order to ensure the fire resistance of wooden building structures in accordance with the requirements of the current building codes of Ukraine, priority is given to questions of methods that provide an opportunity to predict and evaluate the fire resistance of structures for buildings that are being designed, as well as for already built objects. On the basis of forecasted data, technological methods are used to increase the fire resistance of building structures and reduce the value of the flame spread limit. The main technological systems used for this purpose also include fire-resistant cladding, and given a number of advantages, these

technologies are of considerable interest. It should be noted that the influence of cladding based on impregnated plywood on the fire resistance of wooden beams has not been sufficiently studied.

The specified circumstances, which are included in the system of standards and are valid in Ukraine (EN 1995-1-2:2004 Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2), affected the system of calculation methods for assessing the fire resistance of wooden structures.

The results of the analysis of literary sources and patent review made it possible to formulate a goal and tasks for its achievement.

In the second section, a nomenclature of samples of fragments of wooden beams with and without fire-resistant cladding with impregnated plywood was formed for conducting fire tests in order to study their behavior under the influence of the standard fire temperature regime.

The experimental equipment and materials for the production of samples-fragments of wooden beams are described.

The method of manufacturing samples of fragments of wooden beams protected by cladding with impregnated plywood is described, with a justification of their design parameters and quantity, which ensures the reliability of the tests.

The method of researching the behavior of test samples-fragments of wooden beams unprotected and protected by means of their fire-resistant cladding on the basis of impregnated plywood is described.

In the third chapter, a study of the regularities of temperature changes in the internal layers of samples-fragments of wooden beams covered with fire-resistant cladding based on impregnated plywood, which depends on the test time in the conditions of the standard fire temperature regime, was carried out.

The regularities of changes in the end and side charring depth of the experimental samples depending on the time of their exposure under the standard temperature regime of the fire were revealed and the corresponding regression dependencies were established, which are described using regression coefficients of the type $d(t) = b_1 + b_2 t + b_3 t^2 + b_4 t^3$.

The rates of carbonization of the side and end sides of the cross-section of samples-fragments of a wooden beam lined with fire-resistant plywood were determined, depending on the time of their exposure in the conditions of the standard fire temperature regime, which are 0,31 mm/min and 0,96 mm/min, respectively.

Also, the delay time for the beginning of charring of a wooden beam with a fire-resistant lining is established, which is, depending on the thickness of the lining, from 11 minutes to 20 minutes from the end side of the section and from 15 minutes to 25 minutes from the side of the section.

The regularities of temperature distributions in different time intervals of fire exposure according to the standard temperature regime, which are 15 min, 30 min, 60 min for samples-fragments of wooden beams with a thickness of cladding with fire-resistant plywood in the range from 0 mm to 20 mm, were revealed. During 60-minute fire tests, the temperature indicators of the first thermocouple for samples with a protection thickness of 0 mm were 599 °C, 10 mm – 248 °C, 20 mm – 219 °C, which confirms the dependence of the charring depth on the thickness of the fire-resistant lining.

The results of experiments on the process of heating and carbonization of protected wooden beams by cladding with fire-resistant plywood and unprotected wooden beams are analyzed, which determines the adequacy of the obtained results.

The fourth chapter of the dissertation describes a mathematical model for predicting the geometric cross-section of fire-resistant wooden beams under fire conditions. Using the developed mathematical apparatus, contours of the charred zone were constructed for various wooden beams without fire protection and with fire-resistant cladding of different thicknesses. Accordingly, the defined parameters t_{0s} and t_{0e} are the delay time of the charring process on the lateral and end sides of the cross section of the wooden beam. The delay time of the charring process on the sides of the beam cross-section is determined based on the generalized experimental data given in the previous section of this paper. These calculations were carried out to determine the configuration of Bezier lines, which can be determined using 5 characteristic points, which are fixed on isotherms with a critical temperature. The parameterization of the

Bezier curve functions is based on the assumption that the parameter r is determined by the largest overall size of the beam section in a dimensionless relative representation in the form of a parametric function $r = f(y/h)$. Such an entry is necessary to describe cross-sections with other overall dimensions and their different ratios. In order to analyze the magnitude of the probable error in modeling the charred cross-sectional area of wooden beams with and without fireproof cladding based on impregnated plywood according to our proposed method, the perturbation method was used. The results of calculations based on these parameters with "disturbance" are compared with the results obtained on the basis of initial data without "disturbance". Such a comparative analysis makes it possible to assess the reliability of the method in view of the sensitivity of its error to the experimental error of the conducted experiments, which is no more than 14% and is included in the hierarchical scheme of methods recommended by regulatory documents.

In the fifth chapter, the method of predicting the load-bearing capacity of wooden beams of rectangular section with fire-resistant cladding based on impregnated plywood in fire conditions was used. Taking into account the results obtained in the previous section, a sequence of procedures was proposed for the calculation method of predicting the load-bearing capacity of wooden beams of rectangular section with fire-resistant cladding based on impregnated plywood in fire conditions with a standard temperature regime, which is based on simplified algorithms. One of these algorithms is the use of special nomograms. The indicated nomograms can be constructed on the basis of the obtained regression of the available data on the thicknesses of the fire-resistant coating based on impregnated plywood for wooden beams of rectangular cross-section when providing standard classes of fire resistance. Thus, the obtained results make it possible to determine the sequence of procedures for the implementation of the methodology for predicting the bearing capacity of wooden beams of rectangular cross-section with fire-resistant cladding based on impregnated plywood under fire conditions with a standard temperature regime.

A sequence of procedures when applying this method is also proposed.

Thanks to the conducted research, a calculation method for evaluating the fire-resistant ability of fire-resistant plywood for wooden beams was substantiated and proposed. By means of mathematical modeling, nomograms and tables for assessing the fire resistance class of wooden beams with fire-resistant cladding based on impregnated plywood, a hierarchy of methods was built that allow predicting the exact geometric configuration of the uncharred part of the cross section of the wooden beam and determining its real load-bearing capacity.

Key words: fire protection of wood, fire-resistant cladding, fireproof, fire, fire-resistant plywood, standard temperature regime, charred zone, mathematical model, experimental study, fire resistance class.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION

Articles in scientific and professional publications of Ukraine:

1. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire-protected wood, taking into account its humidity. Collection of scientific papers. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: ChIPB named after the Heroes of Chernobyl of the National Center of Ukraine, 2019. Volume 3, No. 2. P. 106-115.

2. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y. Fragmentary illumination of results of fire test of wooden beams with facing by fire-retardant plywood Collection of scientific works. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: ChIPB named after the Heroes of Chernobyl of the National Center of Ukraine, 2020. Volume 4, No. 1. P. 91 – 96. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.1.-91-96>

3. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood Collection of scientific papers. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: ChIPB named after the Heroes of Chernobyl of the National

Center of Ukraine, 2020. Volume 4, No. 2. P. 97 – 105.
DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105>

4. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Fedchenko S., Zmaha Y. Physico-chemical properties of fire-protective plywood under high temperatures. Collection of scientific papers. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: CHIPB named after the Heroes of Chernobyl National Center of Ukraine, 2021. VOLUME 5 No. 1. P. 129-132. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.129.132>

5. Zmaha M. Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. Collection of scientific papers. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: CHIPB named after the Heroes of Chernobyl National Center of Ukraine, 2021. VOLUME 5 No. 2. P. 125-135. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135>.

6. S. Sidney, V. Kobko, S. Fedchenko, M. Zmaha, N. Zaika. Improvement of the zone method of checking the fire resistance of hollow slabs. . Collection of scientific papers. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: CHIPB named after the Heroes of Chernobyl, NUTSZ of Ukraine, 2022. VOLUME 6 No. 1. P. 95-103. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>

Articles in scientific publications included in the Scopus database:

7. Zmaha M., Pozdieiev S., Nekora O., Zmaha Y., Sidney S. Research of the behavior of the wooden beams with fire protection lining under fire loading International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). Bristol: IOP Publishing Ltd, 2020. Volume 1021. Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012031/pdf>.

Monograph:

8. Zmaha M. I., Zmaha Y. V., Nekora O. V., Pozdieiev S. V., Fedchenko S. M., Shvidenko A. V. Methodology for assessing the fire resistance of wooden beams with fire retardant impregnation. Monograph. Cherkasy: CHIPB named after the Heroes of Chernobyl National Center of Ukraine, 2019 – 125 p.

Utility model patent:

9. Pozdieiev S. V., Nekora O. V., Zmaha M. I., Zmaha Y. V., Novgorodchenko A. Yu. Fire protection method based on impregnated plywood. Utility Model Patent No. 143304, published on July 27, 2020, Bulletin No. 14.

Articles in scientific publications of Ukraine that additionally highlight dissertation research:

10. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y., Novgorodchenko A. Investigation of carbonization of wood beams with different fire protection systems. Collection of scientific works. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: ChIPB named after the Heroes of Chernobyl of the National Center of Ukraine, 2019. Volume 3, No. 1. P. 87-92.

Materials of scientific and practical conferences certifying the approval of the dissertation:

1. Pozdieiev S. V., Zmaha M. I., Novgorodchenko A. Yu., Zmaha Y. V. Research on carbonization of wooden beams with different fire protection systems. *Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference "Problems of Reliability and Durability of Engineering structures and buildings on railway transport". Kharkiv: UkrDUZT, 2019. Part 2. P. 190-191.*

2. M. I. Zmaha, Y. V. Zmaha. Description of a fragment of a sample of a wooden beam with fire-resistant plywood cladding. *Materials of the 9th All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation "Emergency situations: safety and protection". Cherkasy: ChIPB named after Heroes of Chornobyl National Center of Ukraine, 2019. P. 150-152.*

3. Pozdieiev S. V., Zmaha M. I., Zmaha Y. V. Research on charring of fire-resistant wooden beams. *Materials of the international scientific and practical conference "Problems of technogenic and ecological safety: education, science, practice". Kharkiv: NUTSZ of Ukraine, 2019. P. 289-290.*

4. Pozdieiev S. V., Zmaha M. I., Zmaha Y. V. Investigation of the charring depth of samples of fragments of wooden beams lined with fire-resistant plywood. *Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Fire Extinguishing and Liquidation of Emergency Situations" Cherkasy:*

ChIPB named after the Heroes of Chernobyl National Center of Ukraine, 2020. P. 198 – 200.

5. Pozdieiev S. V., Zmaha M. I., Zmaha Y. V. Results of tests of samples of fragments of wooden beams under a standard temperature regime. *Materials of the international scientific and practical conference "Problems of emergency situations". Kharkiv: NUTSZ of Ukraine, 2020. – P. 132-133.*

6. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire protected wood. *Materials of the 10th All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation "Emergency situations: security and protection". Cherkasy ChIPB named after the Heroes of Chernobyl National Center of Ukraine, 2020. – P. 256-258.*

7. Pozdieiev S. V., Zmaha M. I., Nekora O. V., Zmaha Y. V., Sidney S. O. Study of the possibilities of ensuring fire resistance of wooden beams with fire-resistant cladding made of impregnated plywood. *Materials of the international scientific and technical conference "Energy efficiency in transport". Kharkiv: UkrDUZT, 2020. P. 96-98.*

8. Zmaha M., Zmaha Y. Analysis of fire protection cladding methods for wooden beams. *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «The world of science and innovation». London: Cognum Publishing House, 2021. – P. 159-1634.*

9. Pozdieiev S. V., Zmaha M. I., Zmaha Y. V. Field tests of a fragment-sample of a wooden beam covered with fire-resistant plywood. *Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Fire Extinguishing and Eliminating Emergency Situations". Cherkasy: ChIPB named after the Heroes of Chornobyl National Center of Ukraine, 2021. P. 212-214.*

10. A. V. Subota, M. I. Zmaha, O. V. Nekora, Y. V. Zmaha, E. O. Tyshchenko. Results of experimental studies of parameters of regression dependences of charring thickness. *Materials of the 9th international scientific and technical conference "Problems of reliability and durability of engineering structures and buildings in*

railway transport" Kharkiv, November 17-19, 2021: Abstracts of reports. Kharkiv: UkrDUZT, 2021, pp. 176-178.

11. Zmaha Y., Zmaha M. Calculating the fire resistance of exposed wood members. *Materials of the 11th All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation "Emergency situations: security and protection". Cherkasy ChIPB named after the Heroes of Chornobyl National Center of Ukraine, 2021. P. 188 - 189.*

12. Pozdieiev S. V., Subota A. V., Zmaha M. I., Zmaha Y. V. Methods of predicting the bearing capacity under fire conditions of wooden beams of rectangular section. *Materials of the International Scientific and Practical Conference "Problems of Emergency Situations". Kharkiv, May 19, 2022: Abstracts of the reports of the National Center of Ukraine, 2022. P. 16-17.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	31
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ.....	41
1.1. Особливості визначення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій.....	41
1.2. Запобігання аваріям будівель і споруд	45
1.3. Забезпечення вогнестійкості дерев'яних балок.....	50
1.4. Технологічний процес виготовлення фанери.....	54
1.5. Клейові з'єднання.....	62
1.6. Способи виготовлення вогнестійкої фанери.....	66
1.7. Деталі кріплення фанери до дерев'яної балки.....	68
1.8. Методи оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із облицюванням вогнезахисною фанерою.....	73
1.8.1. Експериментальні методи.....	74
1.8.2. Розрахункові методи.....	78
1.9. Мета і завдання дисертації.....	84
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ.....	86
2.1. Номенклатура проведення вогневих випробувань дерев'яних балок на вогнестійкість.....	86
2.2. Експериментальне обладнання та матеріали.....	89
2.2.1. Обладнання та матеріали для виготовлення зразків-фрагментів дерев'яних балок.....	89
2.2.2. Обладнання для проведення вогневих випробувань.....	89
2.3. Методика виготовлення зразків – фрагментів дерев'яних балок, облицюваних вогнезахисною фанерою.....	92
2.4. Методика попередніх досліджень поведінки випробувальних зразків-фрагментів дерев'яних балок не захищених та захищених шляхом їх облицювання вогнезахисною фанерою.....	94
2.5. Методика реалізації теплових режимів нагріву зразків.....	95
2.6. Висновки до розділу.....	100
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛИЦЮВАННЯ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ.....	102
3.1. Результати вогневих випробувань фрагментів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.....	102

3.2. Вимоги норм та правил для визначення глибини обвуглювання дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.....	107
3.3. Результати вогневого впливу та визначення оцінки глибини обвуглювання експериментальних зразків.....	112
3.4. Висновки до розділу.....	119
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ПЕРЕРІЗУ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК.....	121
4.1. Математична модель прогнозування геометричної форми перерізу вогнезахисних дерев'яних балок в умовах пожежі.....	121
4.2. Математична модель для визначення несучої здатності вогнезахисних дерев'яних балок в умовах пожежі.....	131
4.3. Висновки до розділу.....	140
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ.....	142
5.1. Метод прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі.....	142
5.2. Уточнений метод прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі.....	144
5.2.1. Математична модель напружено-деформованого стану у дерев'яних вогнезахисних балках в умовах теплового впливу пожежі.....	145
5.2.2. Розрахункові схеми досліджуваних дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.....	154
5.2.3. Результати розрахунку досліджуваних дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.....	158
5.3. Висновки до розділу.....	162
ВИСНОВКИ.....	163
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	165
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи та відомості про апробацію результатів дисертації.....	186
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	191

ВСТУП

Актуальність теми. Вимоги пожежної безпеки до забезпечення межі вогнестійкості висувають обмеження, щодо вибору будівельних матеріалів і термінів їх експлуатації. Дані обмеження існують для того, щоб вимагаємий рівень безпеки, щодо досягнення граничного стану за показником втрати несучої здатності, зберігався не зважаючи на старіння будівельних конструкцій. Обмеження за вимогами пожежної безпеки відіграють особливо важливу роль в будівельній індустрії під час оцінки індивідуального залишкового ресурсу, під яким розуміється тривалість експлуатації від даного моменту часу до досягнення граничного стану при дії високих температур на дані конструктивні елементи.

Сучасні дерев'яні будівельні матеріали мають широкий спектр використання, адже деревина – це природний, гігроскопічний, відновлювальний матеріал. Згідно з вимогами державних будівельних норм, дерев'яними конструктивними елементами можуть проектуватися балки, арки, ригелі тощо. Зазначені несучі конструкції сприймають навантаження, що підвищує рівень небезпеки, тому виникає необхідність забезпечення нормованого часу їхньої вогнестійкості.

Проаналізувавши праці науковців України та закордону, а саме: Бехти П. А., Бриня О. І., які досліджують способи виготовлення вогнезахисної фанери та вплив різних компонентів вогнезахисних просочень; Антонова А. В., Новака С. В., Жартовського В. М., Цапка Ю. В., які досліджують розроблення та удосконалення вогнезахисних речовин для деревини; Белікова А. С., Семерака М. М., що досліджують фундаментальні та прикладні технології, теплофізику, термодинамічні процеси в різних матеріалах; Поздєєва С. В., Змаги Я. В., Фещука Ю. Л., Шналя Т. М., Новгородченко А. Ю., які досліджують методи вогнестійкості дерев'яних конструкцій при стандартних температурних режимах; також зарубіжних науковців: White R. H., Schaffer E. L., Browne F. L., Lau P. W. та інших, було виявлен, що питання визначення межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери

залишається недослідженим, а відсутня нормативна база межі вогнестійкості для такого виду конструкцій не дає можливості застосовувати розрахункові методи проектування вогнестійкості дерев'яних балок, використовуючи такі вогнезахисні системи. Враховуючи вище викладене, варто зазначити, що встановлення закономірностей, які визначаються геометричними конфігураціями зони обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери від їх конструктивних параметрів, є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація підготовлена в межах виконання розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р «Про схвалення Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року», а також відповідно до розділу 2 п. 17 «Плану наукової та науково-технічної діяльності ДСНС України на 2021 рік», розділу 2 «Плану наукової та науково-технічної діяльності Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля (ЧПБ) НУЦЗ (Національного університету цивільного захисту) України на 2021 рік». Дослідження є складником технічного завдання науково-дослідної роботи в Черкаському інституті пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України «Удосконалення розрахункового методу прогнозування цілісності залізобетонних конструкцій в умовах пожежі» («Цілісність – залізобетон»), державний реєстраційний номер НДР – 0121U109414, де здобувач був виконавцем.

Мета проведення досліджень в даній роботі полягає у розкритті закономірностей залежності конфігурації зони обвуглювання дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери від конструктивних параметрів несучої конструкції та часу експонування за стандартним температурним режимом, що є підґрунтям для створення ієрархії методів з метою прогнозування поведінки дерев'яних балок даного типу, як частини сучасної нормативної бази щодо забезпечення пожежної безпеки будівель із дерев'яними конструкціями.

Для досягнення поставлених цілей, були сформовані такі **завдання**:

- проаналізувати статистичні дані щодо пожеж в Україні за останні роки;

- провести аналіз вимог нормативно-правової бази України щодо вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними системами та без них;

- розробити методіку експериментальних досліджень на основі вогневих випробувань фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом часу в межах діапазону стандартних класів вогнестійкості для даного типу балок;

- на основі проведених експериментальних досліджень розробити методіку інтерполяцій обвугленої зони в перерізах дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери із використанням узагальненого математичного описання за допомогою ліній Без'є;

- дослідити закономірності залежності геометричних параметрів обвугленої зони та межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери від конструктивних параметрів балок та часу теплового впливу за умов стандартного температурного режиму пожежі;

- розробити ієрархічну систему методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок, захищених вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, на основі створених довідникових таблиць, номограм та математичного описання геометрії обвугленої зони цих балок.

Об'єкт дослідження – методи розрахункового оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок прямокутного перерізу.

Предмет дослідження – вплив конструктивних параметрів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та часу впливу стандартного температурного режиму пожежі на їх вогнестійкість.

Методи дослідження. Для розроблення методіки розрахунку застосовувалися експериментальні, табличні і теплофізичні методи дослідження температурних розподілів у середині перерізу дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та для побудови ліній контурів зони обвуглювання, доповненням яких було математичне моделювання. Для перевірки

достовірності та адекватності отриманих результатів експерименту та математичного описання зони обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери застосовувалися методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо розкриття закономірностей залежності геометричних характеристик обвугленої зони та межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу, захищених вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, від їх конструктивних параметрів несучої конструкції та часу теплового впливу за умов стандартного температурного режиму пожежі, що дозволяє суттєво розширити номенклатуру вогнезахисних матеріалів для забезпечення пожежної безпеки дерев'яних балок.

При цьому отримані такі основні наукові результати:

- вперше запропоновано метод описання обвугленої зони в перерізах дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що дозволяє встановлювати належність дерев'яних балок із вогнезахистом даного типу до того чи іншого класу вогнестійкості;

- визначено торцеву та бічну швидкості обвуглювання дерев'яних балок із вогнезахистом на основі просоченої фанери, які склали відповідно 0.96 мм/хв та 0.31 мм/хв, а також час затримки початку обвуглювання, що складає в залежності від товщини облицювання від 11 хв до 20 хв на торці перерізу та від 15 хв до 25 хв на бічній стороні перерізу, отримані показники використовуються як частина початкових даних для реалізації розробленого методу оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок;

- встановлено закономірність залежності вогнестійкості від найбільш значущих параметрів, а саме: відношення площі обігрівної поверхні балки до її об'єму (A_b/V), товщини облицювання (d), коефіцієнту навантаження (μ_{fi}), що має вигляд:
$$U_{fi} = 286.99 - 5914.7 \cdot A_b/V - 2.57 d - 196.99 \mu_{fi} + 206.25 \cdot A_b/V d + 170.45 \cdot A_b/V \mu_{fi} + 0.261 d \mu_{fi} - 17.045 \cdot A_b/V d \mu_{fi};$$

- запропоновано ієрархічну систему методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок різної конфігурації, що захищені вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, за допомогою створених довідникових таблиць, номограм та запропонованого алгоритму реалізації уточненого методу оцінювання класу вогнестійкості даних конструкцій, що є основою визначення кінцевих елементів для оцінки межі вогнестійкості із врахуванням реальної конфігурації обвугленої зони балки;

- набуло подальшого розвитку використання методики оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із облицювальними вогнезахисними системами на основі просоченої фанери;

- удосконалено експериментальну та розрахункову базу забезпечення необхідних вимог щодо вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджені результатами аналізу літературних джерел і нормативно-правових вимог щодо вогнестійкості дерев'яних конструкцій; відповідністю розроблених методів дослідження поставленій меті і завданням; адекватністю та достовірністю отриманих результатів експериментально-вогневих досліджень; удосконаленням розрахункових методик для оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням відповідно до вимог чинних національних стандартів; апробацією та застосуванням на практиці впроваджених результатів досліджень.

Практичне значення отриманих результатів та впровадження результатів роботи полягає у розробленні розрахункового методу підвищеної точності для розрахунку і оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок, захищених шляхом вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери, за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі. Даний метод та існуюча база методів визначення глибини обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням дозволяє спрогнозувати точну геометричну конфігурацію не обвугленої частини балки та визначити її реальну

несучу здатність. Відповідно до цього можна вибудувати ієрархію системи методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок, захищених шляхом вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери, звертаючись до створених довідникових таблиць, номограм та математичного опису геометрії обвугленої зони цих балок. Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок може бути використаний для удосконалення і доповнення існуючої нормативно-правової бази України.

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень реалізовані у новому технічному рішенні – вогнезахисний спосіб на основі просоченої фанери, що захищено патентом на корисну модель України №143304.

Розроблено та запропоновано розрахунковий метод оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що дозволяє доповнити нормативно-правову базу з урахуванням запропонованих нововведень, які дозволяють значно підвищити межу вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням вогнезахисною фанерою за рахунок врахування конфігурації зони обвуглювання та зменшення вартості проведення випробувань і обсягу робіт. Результати виконаних досліджень впроваджено у діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту під час виконання науково дослідних робіт та розробки нормативно-правових актів (м. Київ).

Теоретичні і практичні результати отримані у дисертаційному дослідженні, зокрема, результати досліджень обвуглювання дерев'яних балок із різними вогнезахисними системами, глибини обвуглювання зразків фрагментів дерев'яних балок, що облицьовані вогнезахисною фанерою та положення «Методики оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери» завдяки яким інженери та науковці, які працюють у цій галузі, матимуть можливість підвищити якість та ефективність випробувальних робіт під час оцінювання параметрів вогнестійкості несучих та огорожувальних

конструкцій з деревини. Результати виконаних досліджень прийнято до впровадження у Випробувальному центрі ТОВ «ТЕСТ» (м.Київ).

Теоретичні та практичні результати, отримані в дисертаційному дослідженні впроваджені в освітній процес на кафедрі безпеки об'єктів будівництва та охорони праці Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, при підготовці фахівців освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» при викладанні дисципліни «Стійкість будівель і споруд при пожежі» в розділі теми «Способи підвищення вогнестійкості дерев'яних конструкцій». Також при підготовці фахівців освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» при викладанні дисципліни «Стійкість будівель та споруд в умовах надзвичайних ситуацій» в розділі таких тем «Визначення вогнестійкості дерев'яних конструкцій» та «Вогнестійкість дерев'яних конструкцій та способи її підвищення».

Особистий внесок здобувача полягає: в проведенні аналізу стану нормування і вимог щодо питань вогнестійкості деревини; в розробці та проведенні експериментальних вогневих випробувань зразків-фрагментів дерев'яних балок відповідно до стандартного температурного режиму; в інтерполяції отриманих результатів і математичному описанні ліній границі зони обвуглювання з їх апроксимацією за допомогою ліній Без'є; у визначенні параметрів регресійних залежностей бокової і торцевої товщини та швидкостей обвуглювання досліджуваної балки; в розробці методу визначення несучої здатності дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери. Також особистий внесок здобувача висвітлений в наукових публікаціях виконаних у співавторстві, що відповідають тематиці дисертації:

– В науковій праці «Dependence of burning of materials from fire-protected wood, taking into account its humidity» – здобувач провів дослідження щодо отримання стабільної реакції на швидкість зміни температури під час впливу вогню при стандартній температурній кривій на якість обробки вогнезахисними засобами з урахуванням вологи [53].

– В науковій праці «Fragmentary illumination of results of fire test of wooden beams with facing by fire-retardant plywood» – здобувач провів літературний огляд щодо методів вогнезахисного просочення та методів вогнезахисного облицювання, також провів опис виготовленого зразка для проведення експерименту щодо визначення діапазону залежності бічного і торцевого шару глибини обвуглювання від часу експонування для 10 мм та 20 мм шару вогнестійкої фанери [143].

– В науковій праці «Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood» – здобувач провів аналіз існуючих методів математичного моделювання оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, крім того здобувач створив розрахункову модель для визначення зони обвуглювання дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери [144].

– В науковій праці «Physico-chemical properties of fire-protective plywood under high temperatures» – здобувачем розкрито процеси теплообміну та тепло- і масообміну, що відбуваються у шпоні, що залежать від параметрів цих процесів та теплофізичних властивостей шпону, які визначають теплопровідність, питому теплоємності, термоградієнтну дифузію маси [123].

– В науковій праці «Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood» – здобувачем було проаналізовано всі існуючі експериментальні та розрахункові методи розрахунку межі вогнестійкості облицьованих вогнезахисною фанерою дерев'яних балок, крім того було обраховано теплотехнічні та міцнісні характеристики для стандартної температурної кривої, а також для моделі реальної пожежі обраховано за допомогою алгоритму в програмі MathCAD для реалізації якого використовувався метод половинного ділення запропонований при обмеженні діапазоном температурного нагріву [169].

– В науковій праці «Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading» – здобувач розробив математичні моделі обвуглювання дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням, шляхом

врахування закономірностей зміни геометричних параметрів їх зони обвуглювання у залежності від часу вогневого впливу пожежі [105].

– В науковій праці «Методика оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням» – здобувач провів аналіз вогневих досліджень та прогнозованої геометрії зони обвуглювання досліджуваних дерев'яних балок з вогнезахисними просоченням, за допомогою наближення ліній контурів цієї зони, використовуючи закон Фур'є [109].

– В науковій праці «Вогнезахисний спосіб на основі просоченої фанери» – здобувач провів ряд розрахункових досліджень температурних розподілень у перерізі дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням і отримав параметри регресійних залежностей бокової та торцевої товщини [120].

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дослідження доповідалися і обговорювалися на всеукраїнських, міжнародних, інтернаціональних науково-технічних, науково-практичних конференціях та форумах, таких як:

– 8-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті». (м. Харків: УкрДУЗТ, 2019 р.);

– IX Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». (м. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019 р.);

– Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (м. Харків: НУЦЗ України, 2019.р.);

– XI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.);

– Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій». (м. Харків: НУЦЗ України, 2020 р.);

– Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність на транспорті» (м. Харків: УкрДУЗТ, 2020 р.);

– X Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». (м. Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020 р.);

– VIII International Scientific and Practical Conference «The world of science and innovation» (London: Cognum Publishing House, 2021p.);

– XII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». (м. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021р.);

– XII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021р.);

– 9-а міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків: УкрДУЗТ, 2021р.);

- XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021 р.);

- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій» (Харків, 19 травня 2022 р.: Тези доповідей НУЦЗ України, 2022 р.).

Публікації. Результати досліджень, що висвітлено у дисертації опубліковано в 9 наукових працях: 6 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття що індексується в наукометричній базі Scopus, 1 патент, 1 монографії, а також у 12 доповідях на міжнародних та іноземних наукових конференціях.

Структура дисертації та її обсяг. Робота складається з анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 194 сторінки, з них основного тексту 134 сторінки, 30 таблиць, 38 рисунків, список використаних джерел складає 174 найменувань та займає 20 сторінок, а також з 2 додатків на 8 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ

1.1. Особливості визначення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій

Аналізуючи тенденції розвитку будівельної індустрії останніх років можна прослідкувати, що багатоповерхове дерев'яне будівництво набирає неабияку популярність, порівняно з малоповерховим дерев'яним будівництвом. Зростання зацікавленості пов'язане з тим, що не менш важливим питанням в будівництві є вирішення проблем пов'язаних з екологією. Оскільки в низці європейських країн проводиться багато досліджень і експериментів, що підтримується активним розвитком нових технологій, будівництво з дерев'яними конструкціями має велике розповсюдження за рахунок впровадження сучасних матеріалів. Саме тому, в Німеччині частка будинків з деревини становить до 20 %, в Фінляндії – 35–40 % від загальної кількості будівель. Аналізуючи дані дослідження, що проведені компанією Research Techart [1], в Канаді та США, ця частка становить більше 80 %, а в Японії будівництво з дерева становить близько 40 % від усіх споруджуваних житлових будинків. У світі функціонує багато програм з розвитку екологічного будівництва, однією з навідоміших є «Дерев'яна Європа», що фінансується Європейським союзом, передбачається активне будівництво малоповерхових дерев'яних будівель [1]. Прикладами дерев'яних будівель є:

- однією з перших багатоповерхових будівель із деревини став «Центр дерев'яного інноваційного проектування» у Ванкувері в Північній Америці рис. 1.1 (1). З висотою будівлі – 29,5 м, загальною площею – близько 5000 м² [2], при цьому процес будівництва продовжувався 1,5 роки з 2013 до 2015 року. Повний бюджет будівництва склав приблизно 17,7 мільйонів євро [3]. Завдячуючи прогресуючому розвитку будівництва в Європі, саме там знаходиться велика частина дерев'яних офісних будівель, дерев'яна промисловість набуває широкого розвитку;

- LIFECYCLE TOWER ONE – восьми поверхова будівля, що знаходиться у Австрії, місто Дорнбірн, була введена в експлуатацію в 2012 році. Процес будівництва регламентувався зведенням будівлі зі збірних елементів, будівлю було оснащено технологіями пасивного будинку, що знижує енергоспоживання забезпечуючи при цьому високий рівень стандарту якості. Зображення будівлі на рис. 1.1 (2). [4];

- TREET BERGEN – одна з найвищих в світі дерев'яних будівель знаходиться в Норвегії, місто Берген рис.1.1 (3), будівля висотою – 51м вміщує шістдесят чотири квартири, введена в експлуатацію в 2015 році. Для несучих конструкцій були використані, заздалегідь виготовлені, сорок вісім дерев'яних модулів клеєних брусів перерізом 1м×1м [5].



Рис. 1.1. – Приклади дерев'яних будівель світу. 1-Центр дерев'яного інноваційного проектування, Ванкувер, Канада; 2-LIFE CYCLE TOWER ONE, Дорнбірн, Австрія; 3-Treet Bergen, Берген, Норвегія.

Сьогодні, диктує підвищення якості міцнісних та вогнестійких властивостей матеріалів, при цьому не збільшуючи фінансову складову

будівництва. Дерев'яний брус – будівельний пиломатеріал прямокутного перетину, виготовлений з цільних колод або клеєних дощок. Клеєний брус, порівняно дорожчий, ціна пов'язана з тим, що він має велику кількість переваг, оскільки такий матеріал не розтріскується і не схильний до усадки [6]. Інший не менш розповсюджений та перспективний матеріал – бамбук. Даний матеріал є традиційним для східних країн, де його використовують і в обробленому, і в природному вигляді, до основних переваг його використання можна віднести доступність та високу міцність [7]. Австрійська асоціація дерев'яної промисловості провела наукові дослідження, та отримала нові технології модифікації деревини, «CLT-технологія», це зумовило будівництво за новими технологіями багатоповерхового дерев'яного будівництва (рис. 1.2.).



Рис. 1.2. Приклади дерев'яних будівель Європи: 1) Bridporthouse, Лондон, Великобританія, 8 поверхів; 2) Strandparken, Стокгольм, Швеція. 6 поверхів; 3) Wargramerstrasse, Відень, Австрія 7 поверхів; 4) Maisonde linde, Париж, Франція, 7 поверхів; 5) житловий будинок в Мілані, Італія, 8 поверхів; 6) житловий будинок Holz 8, Бад Айблінг, Німеччина 8 поверхів [8].

Відповідно до п. 9 «Інструкції по роботі з Карткою обліку пожежі», затвердженої наказом Державної служби надзвичайних ситуацій України (далі ДСНС) від 16.08.2017 р. № 445 «Про забезпечення ведення обліку пожеж та їх наслідків» [9]. Так, підрозділами територіальних органів ДСНС впродовж 2021 року в Україні зареєстровано 79457 пожеж. Порівняно з 2020 роком кількість пожеж зменшилася на 21,5 %, що відбулося головним чином за рахунок зменшення кількості пожеж на відкритих територіях (-32,2 %), питома вага яких становить 52,5 % від їх загальної кількості.

Унаслідок пожеж загинуло 1853 людини, у тому числі 35 дітей; 1383 людини отримали травми, у тому числі 90 дітей. Матеріальні втрати від пожеж склали 13 млрд 363 млн 545 тис. грн (із них прямі збитки становлять 3 млрд 181 млн 197 тис. грн; побічні – 10 млрд 182 млн 348 тис. грн).

Конструктивна схема будівлі повинна забезпечувати її міцність і стійкість у випадку локального руйнування несучих конструкцій як мінімум на час, необхідний для евакуації людей. У той же час існуючі методи для оцінки живучості об'єктів в умовах різних дій [10-14]: використовують принцип одиничної відмови і засновані на розгляді практично миттєвого руйнування одного елемента системи в довільній частині будівлі (ці руйнування в даному випадку і є особливою дією); не дозволяють розглянути втрату несучої здатності характерними групами ключових елементів об'єкту в різні моменти часу особливих дій; не дозволяють оцінити час опору об'єкту особливим діям за участю пожежі як основного, найважливішого чинника, що визначає рівень безпеки об'єкту в даних умовах; не враховують, що в нормах вже закладена можливість прогресуючого обвалення об'єктів при найпоширенішій і найнебезпечнішій особливій дії під час надзвичайної ситуації (далі НС), якою є пожежа, – комбінована дія на конструкції робочого навантаження і високої температури пожежі; не враховують, що можливість прогресуючого обвалення об'єкту при НС за участю пожежі вже регламентована в нормах у вигляді міжнародного показника «вогнестійкість», як час від початку дії пожежі до настання того або іншого граничного стану. В основу пропонованого [15-19]

загального підходу оцінки опору будівель проти прогресуючого обвалення при комбінованих особливих діях внесені положення добре розробленої теорії стійкості (часу опору) конструкцій і будівель проти прогресуючого руйнування при дії пожежі, які є частковим випадком загальної теорії стійкості [18]. Доведена спільність методичних і фізичних принципів, що лежать в основі уявлень про «довговічність», «вогнестійкість», «стійкість» об'єктів [18]. Йдеться про те, що причиною прогресуючого обвалення того або іншого об'єкту завжди є раптове виникнення нової, непередбаченої нормальними умовами експлуатації, комбінації навантажень. Це відбувається тоді, коли на конструкції об'єкту, окрім робочих (експлуатаційних) навантажень, в результаті «форсмажорних» обставин раптово починає діяти додаткове пожежне навантаження. Комбінації робочих (експлуатаційних) і «форсмажорних» додаткових навантажень на будівельні об'єкти під час надзвичайних ситуацій пропонується називати «комбінованими особливими діями». Таким чином, при різних надзвичайних ситуаціях необхідно розглядати різні варіанти комбінованих особливих дій. Особливий характер небезпеки комбінованих особливих взаємодій за участю пожежі підтверджується тим, що в міжнародних нормах пожежної безпеки будівель і споруд введені спеціальні регламентації часу, протягом якого конструкції, будівлі і споруди повинні чинити опір комбінованим діям робочих навантажень і високотемпературній дії пожежі. При цьому час опору об'єкту, що регламентується, ув'язується в нормах з іншими елементами системи протипожежного захисту об'єктів, такими як протипожежні перешкоди, протипожежні розриви, заходи по евакуації людей і т.д.

1.2. Запобігання аваріям будівель і споруд.

Фізичною основою процесу руйнування твердих тіл є процес накопичення пошкоджень і деформацій, що розвивається в часі, в структурних елементах твердих тіл [18]. Такий складний об'єкт, як будівля, може мати декілька рівнів структурних елементів, які можуть відчувати прогресуюче руйнування [15-21].

Основою і змістом коефіцієнту конструктивних меж (далі ККМ) [18] є поняття про «довговічність» тіла, як час його існування від моменту прикладення того або іншого навантаження до настання заданого граничного стану, а також з'ясування того, що відбувається в напруженому тілі впродовж його довговічності. Багаточисельні дослідження механізму руйнування, довговічності різних матеріалів і конструкцій в умовах комбінованих особливих дій показали [18] існування стійких закономірностей зміни міри руйнування, міцності, деформативності об'єктів у широкому діапазоні різних комбінованих дій. Це дозволяє використовувати представлення ККМ для опису механізму руйнування об'єктів при комбінованих особливих діях [15-21]. У будь-якому будівельному об'єкті може бути декілька рівнів структурних елементів, зміна стану яких може приводити до прогресуючого руйнування об'єкту в цілому. В якості такого роду рівнів структурних елементів можуть розглядатися: Рівень 1. Окремі конструктивні елементи будівлі. Граничне перебування елемента на цьому рівні є останньою стадією накопичення порушень структури і деформацій цього елемента у вигляді втрати його несучої здатності. Рівень 2. Характерні групи конструктивних елементів будівлі. Всі конструктивні елементи будівлі, що входять до тієї або іншої характерної групи, знаходяться в одному і тому ж стані і піддаються однаковим впливам. У цьому випадку настання граничного стану у вигляді втрати несучої здатності відбувається одночасно для всієї групи елементів, що входять до тієї або іншої характерної групи.

Час, протягом якого характерна група конструкцій зберігає свої несучі, захисні функції в умовах комбінованих особливих дій, пропонується [15,16] називати стійкістю характерної групи конструктивних елементів.

Вогнестійкість [22] є міжнародною пожежно-технічною характеристикою, яка регламентована будівельними нормами і правилами, і характеризує здатність конструкцій чинити опір дії пожежі. У зв'язку з цим вогнестійкість є базовим елементом всієї системи протипожежного захисту будівель, так як служить визначальним параметром для вибору інших елементів захисту. Запас міцності основних конструкцій будівлі має визначальну роль і при виникненні

комбінованих особливих впливів типу «удар – вибух – пожежа». У будівельних нормах [23-26] вогнестійкість використовується також в якості основного показника при проектуванні такого елемента системи протипожежного захисту як протипожежні перепони. Для різних видів протипожежних перешкод в якості характеристики, що регламентується, використовують значення їх «межі вогнестійкості». Ступінь вогнестійкості будівлі є вихідною характеристикою при проектуванні евакуації людей і проти димового захисту, проектуванні інженерних систем будівлі, систем пожежної сигналізації тощо. Численні випробування будівельних конструкцій на вогнестійкість [27-31] дозволили виявити основні причини та характер руйнування при дії вогню залізобетонних, сталевих, дерев'яних та інших конструкцій. Узагальнення результатів вогневих випробувань [28-32] дало можливість створити каталог довідкових даних, за допомогою якого можна визначати значення фактичних меж вогнестійкості основних будівельних конструкцій, деякими основними вимогами яких є:

- будівлі висотою до 16 поверхів поділяються на 5 ступенів вогнестійкості;
- конструкції цих будівель повинні виконуватися з негорючих матеріалів;
- мінімальні межі вогнестійкості конструкцій багатофункціональних будівель підвищеної поверховості, що мають особливу ступінь вогнестійкості, повинні бути не менше: несучі стіни – REI 180; колони – R 180; елементи перекриттів (балки, ригелі, рами, ферми) – R 180; протипожежні перекриття – REI 180; огорожувальні конструкції ліфтових шахт – REI 90; огорожувальні конструкції шахт протипожежних ліфтів – REI 120; огорожувальні конструкції комунікаційних шахт – REI 60; протипожежні стіни – REI 180; стіни сходових клітин – REI 180;

- середнє пожежне навантаження цих будівель не повинно перевищувати 50 кг/м^2 (при перерахунку на деревину) [33].

Для будівель висотою понад 100 м межу вогнестійкості перерахованих вище основних конструкцій рекомендується збільшувати ще на 1 годину. Дана вимога висувається надмірною, що призводить до подорожчання будівництва та складнощів при проектуванні надвисоких будівель. Фактично йдеться про вимогу

використовувати при висотному будівництві конструкції, які при стандартному випробуванні на вогнестійкість повинні чинити опір температурам до 1100 °C протягом 4 годин. Зазначена вимога відповідає пожежному навантаженню в приміщенні, в еквіваленті деревини, понад 150 кг/м², що перевищує реальні та допустимі значення пожежного навантаження в приміщеннях висотних будівель у 2 рази [33]. У зв'язку з цим, представляється можливим обмежити вимоги норм до максимальної вогнестійкості конструкцій висотних будівель величиною 180 хвилин (3 години).

Згідно з розкладом виїзду [34, 35] і планом залучення сил та засобів, що укладаються в кожному підрозділі і затверджується начальником управління, техніка, що визначена та затверджена вказаними документами, повинна виїжджати на всі пожежі, які виникають у будівлях висотою більше 3-х поверхів у зазначеному районі виїзду. Недостатня укомплектованість автодрабинами та автопідіймачами у пожежно-рятувальних підрозділах не дозволяє повною мірою задовольняти потреби пожежно-рятувальних частин, саме тому для виконання поставлених завдань, окремо визначена техніка може залучатися в райони виїзду інших підрозділів. Висвітлена проблематика може бути вирішена шляхом повного укомплектування технікою пожежно-рятувальних підрозділів, у відповідності з раціональним економічним обґрунтуванням будівництва та оснащенням будівель системами протипожежного захисту, що дозволить зменшити кількість загиблих, травмованих та величину матеріальних збитків від пожеж у багатоповерхових будівлях.

Досвід розслідування причин аварій будівель і споруд показує [36-38], що вони є наслідком порушення вимог нормативних документів при виконанні проектних вишукувань і виконанні будівельномонтажних робіт, виготовленні будівельних матеріалів, конструкцій і виробів. Наслідки вказаних порушень посилюються недотриманням норм і правил технічної експлуатації будівель і споруд. Як правило, аварії є наслідком нераціонального поєднання декількох з вказаних чинників. При цьому необхідно відзначити, що допущені під час будівництва дефекти критичного характеру потенційно є причинами, здатними

при невідгідному поєднанні чинників дії на конструкції викликати їх обвалення. Важливим аспектом для учасників будівництва, пов'язаним із запобіганням аваріям, є знання їх причин і динаміки зміни цих причин на різних етапах розвитку будівельного комплексу.

Технічний аналіз аварій [38] дозволив виділити основні їх причини. Враховуючи, що останніми роками основна доля аварій пов'язана з порушенням правил технічної експлуатації будівель і споруд, то доцільно зупинитися на причинах такого роду аварій, адже вони в більшості своїй характерні і при реконструкції будівель і споруд.

Основні порушення при експлуатації будівель і споруд [39-42]:

1. Незабезпечення періодичності техобстеження, поточного і капремонтів.
2. Недотримання елементарних вимог нормативних документів і технології виробництва ремонтних робіт, незнання працівниками експлуатаційних організацій цих вимог.
3. Відсутність передування ремонтним роботам техобстеження конструкцій будівель і споруд.
4. Відсутність або низька якість проектної документації на проведення капітального ремонту.
5. Відсутність авторського нагляду проектних організацій за виконанням ремонтних робіт.
6. Відсутність правил проведення ремонтних роботи.
7. Неврахування при ремонтних роботах первинних розрахункових навантажень на конструкції будівель і споруд.
8. Позапроектні навантаження на конструкції будівель в процесі їх експлуатації.
9. Зниження несучої здатності конструкцій у процесі експлуатації будівель через не професійне виконання технологічних отворів різного роду.
10. Проведення робіт по капремонті, переплануванню, переобладнанню будівель і приміщень без необхідних проектних рішень, що сприяє зниженню несучої здатності конструкцій та збільшенню навантажень на окремі конструкції.

11. Недотримання режиму температурної вологості будівель і конструкцій при їх експлуатації і виконанні ремонтних робіт.
12. Відсутність нормальної експлуатації санітарно-технічних систем і інженерних мереж, постійне замочування несучих конструкцій у районах санітарних вузлів, конструкцій технічних поверхів і підвалів техногенними водами.
13. Невчасне усунення протічок покрівлі.
14. Перезволоження зовнішніх стін, парапетів і карнизів будівель унаслідок ліквідації різного роду захисних елементів (відливів, стяжок).
15. Перезволоження конструкцій фундаментів, підвалів і технічних поверхів поверхневими і ґрунтовими водами унаслідок ліквідації водовідводів, відмосток і гідроізоляції.
16. Вимивання ґрунтових основ поверхневими і ґрунтовими водами, їх просідання.
17. Сприяння розвитку гнильних процесів дерев'яних елементів будівель, в першу чергу покриттів і перекриттів.
18. Сприяння руйнуванню захисного шару бетону залізобетонних конструкцій і пов'язаної із цим корозії робочої арматури.
19. Невідновлюваність антикорозійного захисту металевих елементів конструкцій.
20. Відсутність забезпечення стійкості конструкцій будівель до біошкідників.

1.3. Забезпечення вогнестійкості дерев'яних балок

В цілому будівлі і споруди, та їх окремі об'ємно-планувальні, та конструктивні елементи, повинні відповідати функціональному призначенню. Прийнято вважати, що дерев'яні будівельні конструкції можуть використовуватися лише в будівлях III ступеня вогнестійкості, оскільки дані конструкції мають межу поширення полум'я М2 [26, 43].

Причиною виходу із ладу дерев'яних конструкцій є зменшення робочого перерізу при горінні у результаті їх обвуглювання. В зв'язку зі зменшення робочого перерізу дерев'яної конструкції, напруження від нормативного

навантаження збільшується і при досягненні втрати несучої спроможності деревини, проходить руйнування конструкції. Відповідно до ДБН В 2.6.-161:2017 [44] при проектуванні дерев'яних конструкцій слід враховувати клас умов експлуатації, клас вогнестійкості конструкцій та групу поширення вогню по даних конструкціях. При цьому вибір конструктивної схеми й загальне компонування будівель повинні забезпечувати необхідну надійність конструкцій протягом проектного строку експлуатації. Особливу увагу слід приділяти відсотку вологості деревини та уникненню застосування дерев'яних клеєних конструкцій у будівлях та приміщеннях з надмірною вологістю [45-52].

Оскільки деревина відноситься до горючих матеріалів, у державних будівельних нормах [47-52] вказано, що дерев'яні елементи горючих покриттів (крокви, лати, балки) у будинках повинні відповідати забезпеченню І групи вогнезахисної ефективності.

Ефективність засобів вогнезахисту, що застосовуються для зменшення пожежної небезпеки облицювальних або оздоблювальних матеріалів, необхідно враховувати для визначення належності до групи вогнезахисної ефективності за показниками пожежно-технічної класифікації будівельних матеріалів.

Щоб розрахувати межу вогнестійкості дерев'яних конструкцій слід розв'язати міцнісну та теплотехнічну задачу, зміст яких полягає у [54-56]:

а) визначенні зміни напружень у розрахункових перерізах несучих конструкцій, що залежать від нормативних навантажень;

б) перевірці умов, щодо міцності дерев'яних конструкції на вплив нормативних навантажень, враховуючи зміни напружень від заданих навантажень, а також залежності від часу впливу вогню на дерев'яну конструкцію до втрати нею несучої здатності;

в) визначенні зміни геометричних параметрів робочого перерізу дерев'яної конструкції від моменту початку займання деревини, при дії полум'я на конструкцію, враховуючи процес її обуглювання.

г) визначенні часу початку займання деревини у конструкції під дією теплового впливу пожежі;

При вирішенні поставлених завдань, особливої уваги потребує питання забезпечення вогнезахисту будівельних конструкцій. На прикладі дерев'яних балок, питання вогнезахисту вирішується шляхом застосування різних систем, зокрема: просочення вогнезахисними речовинами, нанесенням вогнезахисної фарби, облицювання негорючими або важко горючими матеріалами [72-75].

Основним положенням, які слід враховувати при розрахунку дерев'яних конструкцій на вогнестійкість, повинні відповідати наступні пункти:

- дерев'яні конструкції повинні проктуватися та виготовлятися так, щоб зберігати несучу здатність при вогневому впливі протягом заданого часу;
- перевіряючи несучу здатність розрахункові значення жорсткості та міцності слід визначати за ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157 [57];
- розрахунок вогнестійкості конструкцій повинен враховувати проєктні сценарії пожежі, моделі підвищення температури в конструкції та моделі механічної роботи конструкції зі зростанням температури згідно з [26, 47, 58, 59];
- значення навантаження на конструкції розраховуються напруженням та деформацією, які приймаються для розрахунку за стандартних температур, та з урахуванням коефіцієнта зниження рівня навантаження під час пожежі, який визначається відповідно до [27, 49, 52, 60].

За результатами аналізу існуючих нормативних документів, [57, 61-63] було виокремлено найпоширеніші несучі дерев'яні елементи, складено табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Вогнестійкість конструкцій в будівлях різного призначення

Види будівель	III ступінь вогнестійкості		
	балки	перекриття	колони
Клуби, кінотеатри, спортивні споруди	R 60	–	R 120
Будівлі дитячих дошкільних закладів	R 60	R 45	–
Будівлі навчальних закладів	R 60	R 45	–
Будівлі охорони здоров'я і відпочинку	R 60	R 45	R 120
Будівлі культурно-видовищних, культових та дозвіллевих закладів	R 60	R 45	R 120
Будівлі громадського харчування та торгівлі	R 60	–	–

З табл.1.1. можна зрозуміти, що з переліку вибраних конструктивних елементів, балки слід вважати найрозповсюдженішими несучими конструкціями, саме до них висуваються найсуттєвіші вимоги щодо межі вогнестійкості. При цьому забезпечення межі вогнестійкості дерев'яних балок регламентується за граничним станом втрати несучої здатності часом 60 хвилин.

Для виготовлення дерев'яних балок, що є плоскими конструкціями, може використовуватися як цільний, так і клеєний брус.

Балки з клеєного бруса можуть бути: [44,55,58,64-65]

1. масивними клеєдощатими, що складаються із дощок, які склеюють між собою по пласті;
2. тонкостінними клеєфанерними, які складаються із склеєних між собою дощатих поясів та приклеєної фанери до їхніх стінок;
3. тонкостінними клеєними, що складаються із склеєних між собою дощатих поясів та приклеєних листів LVL (OSB) до їхніх стінок;

Відповідно з геометричним обрисом дерев'яної балки вони поділяються на прямолінійні та криволінійні (які повністю виготовлені з тонких дощок – гнутоклеєні) та із криволінійними ділянками. Гнутоклеєні та прямолінійні балки можуть бути змінної та постійної висоти – односхилі та двосхилі. За поперечним перерізом клеєні балки бувають прямолінійні та двотаврові, а серед клеєних тонкостінних балок і клеєфанерних балок розрізняють – коробчасті, двотаврові та двотаврово-коробчасті [64-66].

Для виготовлення клеєної деревини допускаються наступні види хвойних порід деревини: ялина (*PiceaAbies*), ялина (*Abiesalba*), сосна (*Pinussylvestris*), модрина (*Larixdecidua*), північна сосна (*Pinusechinata*), жовтий кедр (*Chamaecyparisnootkatensis*) [67,68].

Виготовлення клеєних балок повинно повністю відповідати вимогам [57,66,69-70], а використані для розрахунків передумови, мають враховувати властивості, що залежать від характеристик використовуваної деревини (однорідна або комбінована) і регламентуються ДСТУ EN338 [71].

Оскільки найбільш поширеною сировиною для виготовлення балок є хвойні породи деревини, то для однорідних клеєних балок показники механічних властивостей визначають із еквівалентних значень шарів сосни. Для того щоб охарактеризувати значення мінімальної міцності балки на згин використовують табличні значення, при цьому враховують наступні розміри поперечного перерізу балки, де висота становить – 600 мм і товщина – 150 мм. Ці дані відносяться і до значень характерної міцності при розтягу вздовж волокон. Через це балки з меншим поперечним перерізом повинні враховувати визначені характерні значення клеєної деревини, а також брати до уваги коефіцієнт обвуглювання [47, 49, 66, 70].

1.4. Технологічний процес виготовлення фанери

Будівельна фанера донині є широкозастосовуваним матеріалом, часто використовується при будівництві легких споруд. Низька ціна фанери в сукупності з її відмінними техніко-експлуатаційними властивостями робить цей матеріал надзвичайно популярним на будівельному ринку.

Шарувата клеєна конструкція, що складається з трьох і більше листів шпони, волокна в суміжних шарах яких розташовуються взаємно-перпендикулярно, називається фанерою. Властивості перпендикулярного нашарування слоїв шпони надають фанері підвищену міцність в різних напрямках та стабільність форми, що є безперечною перевагою в порівнянні з натуральною деревиною. Фанера також, як і деревина, – матеріал, що легко піддається обробці. Поверхня її обробляється різними способами: ламінується, покривається струганим шпоном, фарбами, лаками. Фанера має невелику вагу, легко комбінується з іншими матеріалами, проста в обробці, стійка до перепадів температури, має естетичний зовнішній вигляд. Її міцнісні, теплопровідні і екологічні характеристики набагато вищі від показників інших деревинно-плиткових матеріалів, таких як ДСП, ДВП [76,77]. Фанеру виготовляють шляхом склеювання трьох і більше шарів лущеного шпону. Лущеним шпоном називають

тонкий шар деревини товщиною від 0,3 мм до 2 мм. Листи шпону після просушки промазують тонким шаром клею і склеюють у гарячих гідравлічних пресах. Склеєні пакети фанери розрізають за стандартними розмірами. Сусідні аркуші розташовуються так, щоб напрямок волокон у них був взаємно-перпендикулярним. Завдяки перехресному напрямку волокон фанера відрізняється від інших листових матеріалів порівняно однорідністю фізико-механічних властивостей, а також вона менше жолобиться і розтріскується у різних умовах експлуатації. Згідно з діючими стандартами [70, 71] при виготовленні лущеного шпону є можливість використовувати наступні породи деревини: листяні – береза, вільха, липа, осика, клен, дуб, ясен, бук, граб, тополя, ільм; хвойні – сосна, ялина, ялиця, модрина, кедр. Використання перелічених порід деревини підтверджує, що з певними економічними умовами, у якості сировини для виготовлення фанери, придатний широкий спектр деревинних порід, які можуть задовольняти умови виробництва фанерної промисловості.

До технологічної лінії виготовлення фанери відноситься [78]: гідротермічна обробка сировини; обкорювання та розбирання сировини; лущення та рубка шпону; сушка шпону; сортування шпону; лагодження шпону великого формату та його сортування; лагодження та сортування напів-форматного шпону; фугування країв шпону для зовнішніх шарів; склеювання ребер внутрішніх та зовнішніх шарів; склеювання шпону; комплектування шпону; приготування та нанесення клею; складання пакетів; підпресовка пакетів перед склеюванням; склеювання пакетів шпону; обрізка фанери; сортування не шліфованої та шліфованої фанери; ламінування, обрізка та сортування фанери; фарбування торців ламінованої фанери; упаковка білої та ламінованої фанери; переробка відходів.

Технічні вимоги до фанери загального призначення [76]:

- згідно з регламентом відбувається склеювання фанери марки ФК карбамідоформальдегідним клеєм, виготовленим відповідно рецепту;

- не допускаються вади і дефекти обробки деревини в зовнішніх шарах фанери, що перевищують норми [76];

- за якістю фанери, яка має зовнішні шари шпону з листяних порід, випускають таких сортів: II/II, II/III, II/IV, III/IV, IV/IV;
- за ступенем механічної обробки поверхні фанера поділяється на шліфовану з однієї сторони та шліфовану з двох сторін;
- листи фанери обрізаються під прямим кутом. Допустима косина може складати не більше 2 мм на 1 м погонної довжини крайки листа;
- допустиме відхилення прямолінійності може складати не більше 2 мм на 1 м крайки довжини листа;
- товщина фанери повинна відповідати кількості шарів, що залежить від схеми технологічного режиму виробництва;
- шари шпону у фанері, що розміщуються симетрично мають бути однакової товщини, однакової породи деревини та розташовуватися в однаковому напрямку волокон.

Шаруватість фанери та розміри листів повинні відповідати табл. 1.2:

Таблиця 1.2. – Розміри та шаруватість фанери марки ФК загального призначення

Найменування	Значення
Довжина, мм	1525
Ширина, мм	1525
Товщина, мм	10 \pm 1,0
Шаруватість	9
Вологість фанери, %	5-10
Вміст формальдегіду у фанері	До 10 г на 100 г

Для виготовлення фанери марки ФК загального призначення, згідно з вимогами технологічного регламенту, з поверхневими шарами шпону з листяних порід використовують луцений шпон, який повинен відповідати технічним вимогам [71,76,79]:

- за породою деревини допускається використання луценого шпону вільхи і берези;

- за якістю лущений шпон може бути наступних сортів: Е, І, ІІ, ІІІ, ІV ;
- за розмірами лущений шпон повинен відповідає вимогам, що зазначені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3. – Розміри лущеного шпону

Найменування	Розміри
Довжина, мм	1600
Товщина, мм	1,2 \pm 0,05
Ширина, мм	1600

Для виготовлення фанери на підприємствах здійснюється відбір шпону, що в подальшому впливає на сорт фанери. За наявності дефектів і вад обробки деревини лущений шпон повинен відповідати нормам [71, 76, 79] найголовнішими з яких є: кінцева вологість сухого шпону 6 – 12 %; використання карбамідоформальдегідної смоли марки КФМТ-15Ф (ТУ 25.471 – 42 - 94) [80] основні властивості якої розкриті у табл. 1.4.

Таблиця 1.4. – Властивості смоли марки КФМТ-15Ф

Показник	Величина
Вигляд ззовні	Однорідна суспензія від білого до світло-жовтого кольору без механічних включень
Густина, г/см	1,29
В'язкість смоли при t=20 \pm 0,5°C, мПа	700-1100
Масова частка вільного формальдегіду, %	0,2
Визначення масової частки сухого залишку, %	66 \pm 0,5
В'язкість клею при t=20 \pm 0,5°C, мПа	80-150
Час желатинізації композиції при t=100°C, с	60-75

До фізичних властивостей шпону насамперед слід віднести об'ємну вагу, вказаний показник залежить від кількості паренхіми і будови річного шару. Не менш важливою властивістю є відносна щільність деревини, що характеризує ступінь рівномірності розміщення частин деревини для визначеного об'єму.

Показник відносної щільності визначають враховуючи будову річного шару та розподіл судин в деревині. Даний показник важливий для фанерного виробництва, оскільки впливає на можливість отримувати тонкі та довгі листи шпону без викришування і розривання волокон. Відносна щільності породи деревини за показником ступені, що застосовуються для виготовлення фанери, розподіляється приблизно так: найменшу відносну щільність мають ясен, дуб; середню – клен, бук; найбільшу – береза, осика, липа, вільха [42, 67, 69].

Основними факторами, для створення красивої текстури зрізу поверхні є серцевинні промені а також неоднорідність літньої та весняної частин річного шару. Якщо серцевинні промені широкі, то текстурний малюнок гарніший. Одноманітний малюнок текстури мають породи деревини з вузькими серцевинними променями, рівномірно розміщеними судинами і тонкими волокнами. З цього можна зробити висновок, що деревина має рівномірну текстуру при високій відносній щільності, а нерівномірну – при найменшій відносній щільності.

За ступенем твердості деревинні породи, які найчастіше застосовуються у фанерному виробництві, класифікуються в такому порядку: дуже м'які – осика, липа і тополя; м'які – вільха, береза; тверді – ясен, клен, бук, дуб.

Породи деревини, що використовуються в найбільшій кількості у фанерному виробництві, – береза, липа, вільха та рідше осика, які характеризуються гарними технічними якостями. Деревина таких порід легко лущиться, має однорідність будови і рівномірну щільність, що дозволяє отримувати цілісні великі і тонкі листи шпону, при цьому колір деревини однотонний, специфічні запахи відсутні. Перелічені властивості відкривають широкі можливості застосування фанери в будівництві [80-82].

Деревинні породи іншої групи – ясен, дуб мають неоднорідну структуру та містять велику кількість серцевинних променів, що не дозволяє зберігати малюнок при лущенні шпону, проте зберігає красу малюнку при струганні. Тому група даних порід більше придатна для виготовлення струганого шпону. Бук знаходиться в проміжному положенні між обома групами, при цьому його

можливо використовувати як при виготовленні струганого шпону, так і при отриманні лушеного шпону.

Беручи до уваги особливості анатомічної будови деревини, що найбільше впливає на процес лушення деревини, варто впершу чергу акцентувати увагу на застосуванні у фанерному виробництві деревини вільхи та берези. Найчастіше застосовується деревина берези, яка порівняно з іншими породами, має гарні фізико-механічні властивості (табл. 1.5) та добре обробляється різанням [75,76].

Таблиця 1.5. – Значення межі міцності лушеного шпону листяних та хвойних порід під час розтягування

Вид деревини	Межа міцності при розтягуванні, МПа	
	В здовж волокон	В поперек волокон
Береза	75	2,5
Вільха, бук, осика, клен, липа, ільм, тополя	60	1,5
Ялина, сосна, модрина, ялина, кедр	50	1

Деревина вільхи за фізико-механічними показниками та твердістю поступається березі, та завдяки тому, що легко ріжеться, добре шліфується, не змінює форму, імітується під цінні породи деревини теж широко використовується у виробництві фанери [69, 70, 76].

Спресувавши фанеру в гарячому пресі, її охолоджують за умов звичайної температури цеху протягом 24 годин, після чого краї фанери обрізають.

Фанера, яка подається на дільницю обрізки, має відповідати вимогам ГОСТ 3916.1 – 96 [90-93], бути міцно склеєною, не мати тріщин та пухирців та не розшаровуватися при згинанні.

Якщо листи фанери мають перелічені недоліки, така фанера відкладається в стопу некондиційної фанери.

З метою підвищення якості фанери можуть проводитись заходи щодо її покращення за рахунок шпаклювання. Отвори від сучків та тріщини шпаклюють шляхом нанесення шпаклівки ручним шпателем при цьому товщина шару нанесення має бути не більше 0,5 мм над поверхнею листа фанери.

Листи необрізаної клеєної фанери розмірами 1600 мм x 1600 мм, обрізаються з чотирьох сторін під прямим кутом дотримуючись розмірів, які регламентовані стандартами. Різ повинен бути чистим та рівним, не мати сколів, бахроми, розривів волокон. Для уникнення перелічених негативних якостей спочатку фанеру обрізають перпендикулярно волокнам зовнішнього шару фанери, а потім – паралельно. Косина різку листа повинна бути меншою ніж 2 мм на 1 м, а відхилення краю кромки від прямолінійності має бути не більшим ніж 1 мм на 1 м довжини кромки. Граничні відхилення геометричних розмірів листа фанери від розмірів, що регламентовані стандартами не повинно бути більшим ніж ± 4 мм. [87,89,94].

Крайкування фанери відбувається за допомогою форматно-обрізного верстата пачками висотою 42 мм. Спочатку стопи фанери, встановлюють на підйомний стіл, потім її перекладають на каретку. Листи фанери укладають так, щоб одна зі сторін прилягала «жорстким кутом» до направляючої лінійки. Яка, в свою чергу, встановлюється на відстані 25-30 мм до полотна пили. Потім пачку фанери обрізають з двох сторін за допомогою 2-х пильного агрегата. Після цього фанера подається поперечним транспортером до наступного 2-х пильного агрегата, де обробляються дві інші сторони кромки. Правильність геометричних розмірів фанери в технологічній лінії досягається завдяки перпендикулярному розміщенню транспортерів. Після обрізки фанери, її транспортером переміщують на підйомний стіл. Залишки від фанери після обрізки відправляються в окремий контейнер, потім обв'язують їх пакувальною стрічкою і переміщують на майданчик для зберігання [87,90-92].

Поверхню фанери характеризують за показником її шорсткості відповідно до ГОСТ 7016 [95]. Для надання фанері кращого вигляду її шліфують видаляючи нерівності, що викликані технологічним процесом чи структурою деревини. Шліфування фанери відбувається на лінії виробництва, яка включає в себе: калібрувально-шліфувальний верстат; конвеєр і підйомний стіл. Листи фанери, які необхідно шліфувати, подають до калібрувально-шліфувального верстата, де піддають шліфуванню двома шліфувальними стрічками, що розташовуються одна

за одною. Перша шліфувальна стрічка призначена для калібрування поверхні фанери, а наступна – для здійснення чистової обробки поверхні фанери.

З метою двостороннього шліфування фанерри, після виходу із шліфувального верстата її кантують і повторно подають у шліфувальний верстат. Після виходу фанери із шліфувального верстата її поверхню очищують від сміття та пилу. Якщо після двостороннього шліфування поверхня фанери має дефекти, то виявлені недоліки усуваються шляхом ручного доопрацювання шліфувальною машинкою.

Відшліфована фанера по конвеєру транспортується на ділянку для сортування. Границі відхилень щодо товщини листів фанери регламентуються ГОСТ і ТУ [92,95].

Фанеру сортують згідно з вимогами ГОСТ 3916.1-96 [90-91,96]. Сортування стопи фанери відбувається поштучно та має свою послідовність: спочатку її з обох сторін оглядають що до наявності дефектів, після цього візуально перевіряють кромки зрізів та кути на предмет міцності склеювання. У разі виявлення листів із пошкодженими кутами і кромками лист фанери відправляють на повторне кромкування.

Обладнання, яке використовують на технологічних лініях деревообробних фабрик висвітлене в табл. 1.6.

Таблиця 1.6. – Відомість обладнання

№ п/п	Назва обладнання	Марка
1	Клеєнаносний верстат	2 LV 20 «Raute»
2	Прес для підпресування пакетів шпону	П 714 Б
3	Лінія гарячого пресування	30 - VPH
4	Охолоджувальна камера	«Raute»
5	Обрізний верстат	«ЛОФ»
6	Шліфувальний верстат	«COSTA»
7	Круглопилковий верстат для переобрізки фанери	ЦФ-5

1.5. Клейові з'єднання

Для виробництва фанери та фанерної продукції найчастіше використовують карбамідоформальдегідні смоли, характеристика даних смол наведена в табл. 1.7.

Таблиця 1.7. – Карбамідоформальдегідні смоли та їх основні фізико-механічні властивості

Основні показники	Марка смоли		
	КФ-Ж	КФ-МТ	КФ-Б
Вигляд ззовні	Однорідна суспензія без механічних домішок від білого до світло-жовтого кольору		
Масова частка вільного формальдегіду	0,6-1	0,1-0,3	0,6-0,9
Масова частка сухого залишку, %	66-69	64-67	66-69
В'язкість при 20°C, с: по ВЗ-4			
Після виготовлення	-	46-70	41-90
Після 60 діб зберігання	-	160-180	160-200
В'язкість при 20°C, по ВЗ-1 (сопло 5,4 мм)	13-40	-	-
Після виготовлення та 60 діб зберігання	80-120		
Желатинізація:			
При 10°C, с	46-70	34-55	27-40
При 20°C, с	10-30	8-25	2-10
Змішуваність смоли з водою при співвідношенні за об'ємом 1:2	повне змішування	коагуляція не допускається	
Щільність при 20°C, кг/м ³	1250-1280	1250-1270	1260-1280
Температура замерзання, °C	Від 13 до 19		

Абревіатура карбамідоформальдегідних смол включає назву продукту (КФ) та призначення її основних властивостей:

Ж – підвищеної життєздатності;

Б – швидкозатвердіваюча;

МТ – малотоксична.

Для карбамідоформальдегідних смол основною сировиною слугують карбамід $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, формальдегід CH_2O та різного роду каталізатори (аміак NH_3 ,

уротропін $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$, хлористий амоній NH_4Cl , їдкий натрій NaOH), які здатні змінювати кислотність середовища [55, 68, 83, 84].

На властивості смол суттєво впливають такі фактори: молярне співвідношення між формальдегідом і карбамідом. Клеючі смоли виготовляють згідно з регламентом дотримуючись співвідношення від 1:1,5 до 1:2,2, дане співвідношення має суттєвий вплив на в'язкість одержаної смоли та швидкість її затвердіння, а також стабільність і токсичність при зберіганні; активна кислотність смоли, яка впливає на швидкість та повноту протікання реакції поліконденсації смоли.

Якщо кислотність збільшується, то глибина реакції і швидкість її протікання – зростає. Проте, якщо рівень рН малий і надлишок формальдегіду невеликий то існує проблематика передчасної желатинизації та утворення смолоподібних продуктів; температура поліконденсації, що зазвичай підтримується в діапазоні $80\dots 100^\circ\text{C}$; кінцева обробка смоли (вакуум-сушіння), що здійснюється при режимі температури $65\dots 70^\circ\text{C}$ і розрідженні тиску $(9,0\dots 7,6)10^4$ Па, що дає можливість збільшувати вміст сухих речовин в діапазоні від 60 до 70 %. При цьому вилучається метиловий спирт і вільний формальдегід. [71,72,76, 80].

Основними якісними показниками карбамідних клеїв є в'язкість та масова частка вмісту сухих речовин у їх складі. Доцільність застосування клеїв, які мають в своєму складі високий вміст сухих речовин (65...70%) обґрунтовано тим, що дані сполуки менше просочуються в пори деревини, мають підвищену міцність клейового з'єднання і здатні створювати сприятливі умови для пришвидшення процесів склеювання за рахунок зменшення тиску пари, яка утворюється в клейовому з'єднанні. В'язкість клею суттєво впливає на рівномірність його нанесення на склеювані поверхні, товщину клейового шару і, як наслідок, на міцність склеювання.[26,43,44]

Для потреб виробництва фанери застосовуються клеї в'язкість яких становить 60...150с по ВЗ-4. З метою зменшення відсотку поглинання клею порами деревини та недопущення його проникнення через зовнішні шари фанери,

регулювання в'язкості та підвищення еластичності клейової композиції, зменшення рівня внутрішніх напружень, а також для зменшення витрат смоли доцільно включати в склад клеїв модифікуючі добавки та наповнювачі різного роду [84].

Затверджувачі в клей слід додавати після утворення однорідної суміші, утвореної в результаті ретельного перемішування смоли з наповнювачем. На рівень в'язкості і вбирання клею склеюваними поверхнями суттєво впливає показник його спінювання. Процес спінювання відбувається у спінюючих апаратах, в умовах високої частоти обертання мішалки, шляхом перемішування компонентів клею з додаванням піноутворювача. Компоненти клею додають до змішувача в наступному порядку: смола, піноутворювач, затверджувач [80-82].

До спіненого клею можна додавати наповнювачі. Спінювати не рекомендується ті клеї, які призначені для виготовлення конструкційних матеріалів, це пов'язано з можливим утворенням пухирців повітря, які можуть негативно вплинути на міцність склеювання (виступаючи концентраторами напружень) [80,89].

Під час виробництва фанери, в умовах попереднього підпресування пакетів шпону, використання карбамідних клеїв не дозволяє отримати вищої монолітності і транспортної міцності, а ніж за умов використанні фенолоформальдегідних клеїв. Отримати задовільний результат підпресування можливо, застосовуючи карбамідні клеї у складі яких містяться смоли КФ-МТ та КФ-Ж, що мають підвищену в'язкість (70...100 с по ВЗ-4). Якість підпресування також можливо покращувати додаючи до смоли наповнювачі і модифікуючі добавки (наприклад, пшеничне борошно, карбоксилметилцелюлозу, полівінілацетатні дисперсії). Клеї, що містять в своєму складі, як модифікуючі добавки, технічні лігносульфонати є одними з найрозповсюдженіших у промисловому виробництві фанери де в технологічному циклі присутнє попереднє підпресування пакетів шпону [80,81,84,90].

Щоб отримати малотоксичний швидкозатвердіваючий клей на основі карбамідоформальдегідних смол не слід застосовувати хлористий амоній.

Часткова чи повна його заміна іншими солями дозволяє підвищити реакційну здатність клеючих складів, значно прискорює швидкість склеювання, зменшує терміни пресування фанери на 15...20 % або дозволяє зменшити температуру плит пресу на 10...15 °С. Для склеювання при нагріванні в якості затверджувача використовується сірчаноокислий амоній, хлористий амоній. А при холодному склеюванні – 5...10 %-ий розчин молочної або шавелевої кислоти [76,79,89].

Перевагами карбамідоформальдегідних клеїв є: міцне і стійке склеювання, доступність, дешевизна, атмосферостійкість, теплостійкість, висока адгезія з деревиною, гарні діелектричні властивості та суміщаємість з ПВА-дисперсією, у 2...2,5 рази швидше затвердіння порівняно з фенолформальдегідними клеями, особливості процесу склеювання наведено в табл. 1.8.

Таблиця 1.8. – Температура плит пресу та тривалість склеювання

Товщина фанери, мм	Кіл-ть листів в пресі	Час скидання тиску, с			Температура плит пресу, °С		
		125-130	I період	II період	105-110	110-115	115-120
8	1		10-15	90		6,0	4,8
9	1		10-15	120		7,0	5,5
10 шл.	1		10-15	120		7,5	6,0
12	1		10-15	120		8,1	6,5
15	1		10-15	120		10,0	8,2
15 шл.	1		10-15	120		10,5	9,0
18	1		0-15	120		12,0	10,0
18 шл.	1		0-15	120		13,0	10,5
21	1		10-15	120		16,0	13,5

Поряд з існуючими перевагами карбамідні клеї мають і недоліки, зокрема – наявність в їхньому складі непрореагованого формальдегіду. Як наслідок даний формальдегід виділяється під час гарячого склеювання деревини в термопресі, а також при експлуатації готової продукції. Виділення формальдегіду з клею – токсично впливає на організм людини, може сприяти утворенню тріщин в клейовому шарі фанери [76,87,89].

1.6. Способи виготовлення вогнестійкої фанери

Дослідження науковців [79-82] показало, що виготовлення вогнестійкої фанери включає такі технологічні процеси: просочування листів сирого лушеного шпону антипіреном, сушіння просоченого шпону, нанесення клею на поверхню листів, формування пакетів шпону, підпресування та пресування фанерних листів. В якості просочувального вогнезахисного розчину було використано 30%-ий водний розчин, амонію бромистого, амонію сірчаноокислого, діамонійфосфату дотримуючись співвідношення 0,375:0,625:1. Процес просочування лушеного шпону вологістю 60-100 % антипіреном відбувався у холодній ванні впродовж 10 - 70 хв. з температурою розчину 20 °С. Просочені листи шпону складають в стоси дотримуючись перпендикулярного розміщення волокон в суміжних шарах і зберігають в такому стані 1 год., далі листи висушують, наносять клей, формують пакети шпону, пресують їх отримуючи фанеру.

Інші відомі наукові дослідження описують [78,83,84] процес виготовлення вогнебіо захищеної фанери підвищеної водостійкості, яку фанеру отримують за допомогою її просочення в автоклаві. Процес просочення в автоклаві дозволяє просочувати вже готову фанеру та має свою технологічну послідовність. Просочування відбувається 25-30 %-вим водним розчином антипіренів, який має температуру 30-80 °С, після нанесення розчину фанеру поміщають у апарат та створюють вакуум із залишковим тиском 0,05-0,20 кг/см² зазначені умови витримують протягом 10-35 хв, потім тиск вирівнюють до атмосферного, після чого знову його збільшують до 2-6 кг/см² і витримують зазначені умови наступні 20 хв. Перед тим, як вивільняти просочену фанеру з автоклава тиск знову вирівнюють до атмосферного, з апарата видаляють залишки розчину, просочені листи фанери обробляють за допомогою пульверизатора 2 %-вим водним розчином полімерного антисептика дотримуючись пропорції 0,01-20 г/м² активної речовини. Після обробки антисептиком листи фанери просушують, контролюючи щоб кінцевий вміст вологи не перевищував 10 %. Основним недоліком описаного методу є складність технології просочування, що не можливо зробити без

автоклавного обладнання. Варто також зазначити, що просочення листів фанери за всією її товщиною суттєво ускладнюється через наявність клейових шарів, окрім цього, просочення в автоклаві готової фанери може призвести до погіршення механічних властивостей листів фанери чи навіть її руйнування. Ще одним суттєвим недоліком такого способу просочення є сушіння фанери після кінцевої обробки, що призведе до висолювання антипіренів та утворення шару солі, яка кристалізується на поверхні фанери, а також сприяє процесу жолоблення облицювальних листів фанери.

Ще один відомий спосіб виготовлення вогнезахищеної фанери [80-81,83], описує такий порядок процесів, згідно якого сирий лушений шпон просочують антипіреном (діамонійфосфату) у ваннах, прокатують і висушують його, потім формують пакети просоченого, прокатаного, сухого шпону та склеюють їх шляхом термо-пресування. Недоліком описаного способу є ускладнення технологічного процесу, через те що шпон потрібно прокатувати перед процесом сушіння, що сприяє його розтріскуванню.

Наступним відомим способом виготовлення вогнезахищеної фанери, є спосіб при якому в якості прослчувального розчину для сухого шпону використовують антипірени. Після просочування шпон знову висушують, наносять клеєві суміші, формують пакети та склеюють за допомогою технологічного процесу термо-пресування фанери [84]. Застосовуючи цей спосіб, як антипірен використовували діамонійфосфат та добавки сульфату амонію (амонію сірчаноокислого). Недоліком цього способу є негативний вплив на елементи технологічного обладнання для сушіння, зокрема роликові сушарки, через високу корозійну активність застосовуваних антипіренів.

Різноманітність застосовуваних способів та методик, широкий спектр використовуваних антипіренів, підбір клеєвих основ та домішок до клеїв при виготовленні вогнезахищеної фанери викликаний надзвичайною цікавістю і перспективами до використання даного будівельного матеріалу на основі деревини. Так як найбільш використовуваними дерев'яними конструкціями в будівництві являються балки, які повинні відповідати вимогам що висуваються до

межі вогнестійкості згідно з [79,92-94] при впровадженні в практику будівництва будівель із різними вогнезахисними системами, вогнезахист дерев'яних балок шляхом облицювання вогнезахисною фанерою набуває актуальності і потребує методики оцінювання вогнезахисту зазначених конструкцій.

1.7. Деталі кріплення фанери до дерев'яної балки

Згідно з нормами [44, 85-87] для спроектованих згинаних елементів з урахування роботи кріплень необхідно, щоб кріплення елементів не руйнувалися протягом необхідної тривалості вогневого впливу. Для кріплення з'єднання методом дерева до дерева, дерева до деревинних матеріалів та деревинних матеріалів до деревинних матеріалів які фіксуються цвяхами, шурупами, нагелями, та болтами можна вважати не зруйнованими, коли залишкова товщина або поперечний переріз становить 60 % від початкового перерізу за нормальної температури проектування. Вогнестійкість незахищених з'єднань дерев'яних бічних елементів висвітлено в табл. 1.9. згідно з EN 1995-1-1 (р.8).

Таблиця 1.9. – Вогнестійкість незахищених з'єднань дерев'яних бічних елементів

Спосіб з'єднання	Межа вогнестійкості $t_{d,fi}$, хв	Умови *)
Шурупами	15	$d \geq 3,5$ мм
Цвяхами	15	$d \geq 2,8$ мм
Нагелями	20	$t_1 \geq 45$ мм
Болтами	15	$t_1 \geq 45$ мм
З'єднання відповідно до EN 912	15	$t_1 \geq 45$ мм
*) d – діаметр деталі кріплення; t_1 – товщина бічного елемента		

Для з'єднань цвяхами, нагелями й шурупами з незахищеними оголовками межа вогнестійкості $t_{d,fi}$, що більша за вказану в таблиці 1.9, та при цьому менша за 30 хв, швидко досягається збільшенням вказаних величин за допомогою значення a_{fi} :

– ширини та товщини бічного елемента;

– відстань від грані та країв до деталей кріплення [88].

$$a_b = \beta_n k_{flux} (t_{req} - t_{d,fi}), \quad (1.1)$$

де β_n – умовна розрахункова швидкість обвуглювання;

k_{flux} – коефіцієнт теплового потоку по довжині деталей кріплення;

t_{req} – необхідна нормована межа вогнестійкості деревини;

$t_{d,fi}$ – межа вогнестійкості даного незахищеного з'єднання, зазначена у таблиці 1.7.

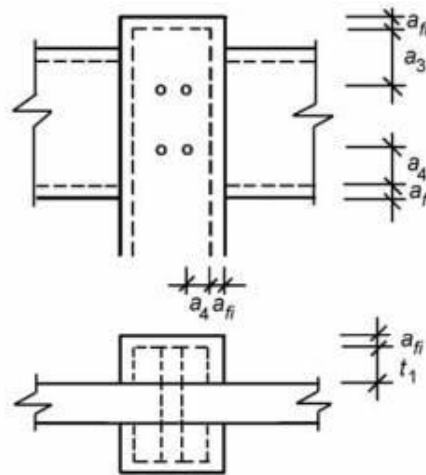


Рис. 1.3. Додаткові товщини й додаткові відстані від граней з'єднань [88]

Якщо різні з'єднання додатково захищені визначеним дерев'яним облицюванням, гіпсокартонними листами типу А та Н або деревинними панелями, то час до початку обвуглювання має відповідати наступним умовам:

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5t_{d,fi}, \quad (1.2)$$

де t_{ch} – час до початку обвуглювання;

t_{req} – вимагаєма межа вогнестійкості конструкції з незахищеним з'єднанням;

$t_{d,fi}$ – межа вогнестійкості незахищеного з'єднання.

Для забезпечення додаткового захисту необхідно запобігати передчасному руйнуванню кріплення. Додатковий захист із гіпсокартонних листів або деревинних панелей необхідно забезпечувати неушкодженим до початку обвуглювання елемента ($t = t_{ch}$). Додатковий захист за допомогою гіпсокартонних листів типу F повинен відповідати межі вогнестійкості $t = t_{req}$ [87,88].

Ряд правил, які повинні застосовуватися для кріплення додаткового захисту за допомогою цвяхів або шурупів [87,88]:

- відстані між деталями кріплення повинні бути меншими 100 мм уздовж країв дошки та 300 мм для внутрішніх кріплень;

- відстані від граней деталей кріплень повинні бути не менше a_{fi} , визначеного за формулою (1.1);

- глибина проникнення з'єднуючого кріплення повинна забезпечувати додатковий захист з дерева, гіпсокартонних листів типу А і Н або деревинних панелей повинна становити щонайменше $6d$, де d – діаметр деталі кріплення.

Правила для болтів і нагелів можуть бути застосовані для незахищених з'єднань, якщо товщина бічної накладки, не менше ніж t_1 , мм, що обраховується за формулою (1.3):

$$t_1 = \max \left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 50 + 1,25(d - 12) \end{array} \right\} \quad (1.3)$$

де d – діаметр болта або нагеля, мм.

З урахуванням стандартного температурного режиму характеристика несучої здатності з'єднання з деталями кріплення на зсув обчислюється за формулою(1.4):

$$F_{v,Rk,fi} = \eta F_{v,Rk} \quad (1.4)$$

де F_v , R_k , f_i – несуча здатність з'єднання деталей кріплення на зсув за умов нормальної температури відповідно до розділу 8 EN 1995-1-1 [87];

$t_{d,fi}$ – розрахункова межа вогнестійкості незахищеного з'єднання, хв;

η – коефіцієнт перехідний;

κ – параметр, висвітлений у таблиці 1.10. [87].

Для нагелів, як і для болтів, значення κ має прийматися таким, що виступають більше ніж на 5 мм.

Несуча здатність з'єднання, що виконано одночасно з болтів та нагелів, повинна прийматися, як сума несучих здатностей зазначених деталей кріплення.

У разі якщо з'єднання виконано за допомогою шурупів або цвяхів з неvistупними головками, для визначення межі вогнестійкості більшої від розрахованої за формулою (1.4.), при цьому становить менше ніж 30 хв, відстані від граней та товщину бічного елемента необхідно збільшувати на величину a_{fi} , яка визначається за формулою (1.5):

$$a_{fi} = \beta_n (t_{reg} - t_{d,fi}), \quad (1.5)$$

В якості альтернативного методу для захисту поверхонь граней деталей конструкції, відстані від її країв можна збільшувати розрахувавши відповідну величину a_{fi} використовуючи формулу (1.1). Однак, якщо межа вогнестійкості становить більше ніж 30 хв, то відстані від країв необхідно збільшувати на величину $2a_{fi}$. Зазначене збільшення величин від країв також слід застосовувати і для стикових з'єднань центральних елементів [87,88].

Таблиця 1.10. – Несуча здатність з'єднань між деталями

Тип та спосіб з'єднання	κ	Максимальний час застосування параметру κ для незахищених з'єднань
Цвяхами й шурупами	0,08	20 хв
Болтами, з'єднання "дерево-дерево" $d \geq 12$ мм	0,065	30 хв
З'єднання відповідно до EN 912	0,065	30 хв
Нагелями, з'єднання "дерево-дерево" $d \geq 12$ мм	0,04	40 хв
*) Значення для шпонок залежить від наявності одного болта на кожні чотири шпонки.		

При облицюванні дерев'яних поверхонь конструкцій таких, як стіни та підлога необхідно враховувати незаповненні порожнини у наступних випадках:

- якщо вогнезахисне облицювання має один або два шари дерев'яної обшивки або панелей з деревини, за умов коли час руйнування облицювання t_f , k_0 вважають рівним 0,3. Відповідно слід вважати, що значення k_0 зростає лінійно до одиниці в часовому проміжку протягом наступних 15 хв;

- якщо вогнезахисне облицювання має один або два шари гіпсокартонного листа типу F, то момент початку обуглювання t_{ch} , k_0 слід вважати рівним одиниці. Для часу $t < t_{ch}$ вважається допустимим використання лінійної інтерполяції.

Для панелей з деревини і дерев'яного облицювання відстань між шурупами і цвяхами по периметру повинна бути не більшою ніж 250 мм та 150 мм відповідно. Глибина проникнення кріпильного елемента повинна бути що найменше у 8 разів більшою від діаметру кріпильного елемента для несучих панелей і що найменше у 6 разів більшою для панелей, які не перебувають під навантаженням.

Для проектування облицювання з листів гіпсокартону типу А та Н достатньо керуватися правилами для проектування за умов нормальної температури враховуючи глибину проникнення, розміри і відстані до граней. Але, слід пам'ятати, що для шурупів внутрішній розмір і периметр має не перебільшувати 300 мм і 200 мм відповідно[87,88].

Багатошарові панелі, що з'єднуються між собою розташовують в шаховому порядку дотримуючись відстані нашарування не менше 60 мм. Кожну панель прикріплюють окремо.

Шари ізоляції та деревина, що враховують під час розрахунку, закріплюються щільно до дерев'яної рами з метою запобігання обвалу чи руйнуванню.

Вогнезахисні панелі з деревини або дерев'яне облицювання конструктивних елементів будівлі таких як балки та колони, мають

закріплюватися за допомогою шурупів або цвяхів до конструктивного елемента конструкції (рисунок 1.4).

Облицювальні панелі не повинні кріпитися до іншої панелі, вони мають кріпитися лише до елемента конструкції. Для облицювання, яке має декілька шарів, кожен шар треба закріплювати окремо, а з'єднання треба розташовувати в шаховому порядку враховуючи відстань нашарування, яка складає не менше 60 мм.

Відстані між деталями кріплення не повинні перевищувати 200 мм або перевищувати більше ніж у 17 разів товщину вогнезахисної панелі h_p обираючи те значення, яке менше.

Відстань кріплення від грані елемента конструкції, яку захищають, не повинна перевищувати 3 товщини панелі h_p і не повинна бути меншою ніж 1,5 товщини панелі або 15 мм, обираючи менше значення. [88].

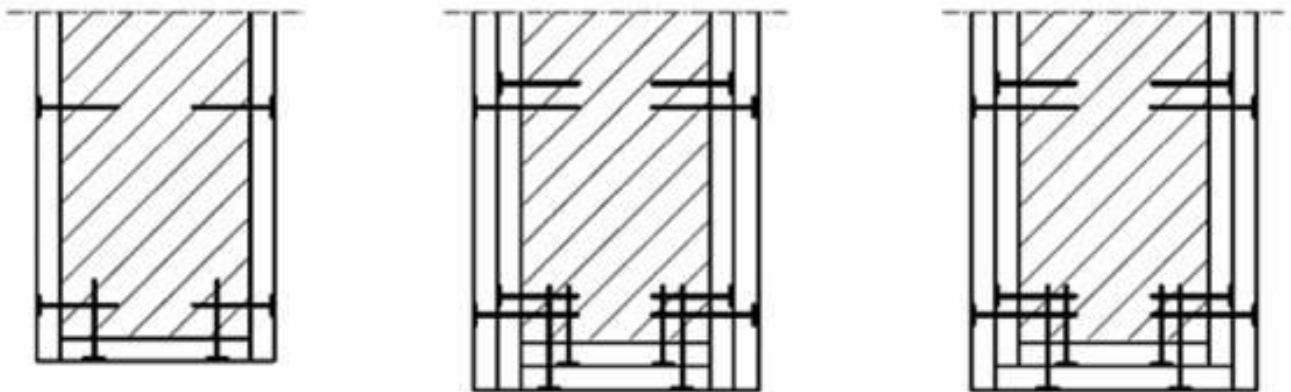


Рис.1.4 – Приклади закріплення захисних панелей до балок

1.8. Методи оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із облицюванням вогнезахисною фанерою

Будівельні матеріали з деревини повинні відповідати I групі вогнезахисної ефективності, але при застосуванні в будівництві різних вогнезахисних систем не завжди зберігається можливість визначити ступінь вогнестійкості. Рішення щодо віднесення конструкцій до того чи іншого ступеню вогнестійкості слід приймати

оцінивши вогнестійкість конструктивних систем будівлі в цілому або оцінюючи кожную частину такої системи окремо. Вогнестійкість можливо оцінити за допомогою розрахункового та експериментального методу згідно зі стандартами, що відповідають європейським нормам проектування будівель, або за методиками, які розроблені враховуючи отримані дані проведених вогневих випробувань конкретних конструктивних елементів будівлі.

Тепло, що виділяється при пожежі, є основною причиною її розвитку та виникнення багатьох явищ, що її супроводжують. Це тепло викликає нагрівання оточуючих зону горіння горючих і негорючих матеріалів. Горючі матеріали нагріваються до критичної температури потім загораються, а негорючі розкладаються, плавляться, будівельні конструкції – деформуються і втрачають міцність. Виділення тепла на пожежі супроводжується інтенсивним рухом газових потоків і задимленням простору біля зони горіння.

Швидкість протікання теплових процесів залежить від інтенсивності виділення теплоти в зоні горіння. Кількісною характеристикою зміни тепловиділення на пожежі в залежності від різних умов горіння є температурний режим. Під температурним режимом під час пожежі в приміщеннях розуміють зміну середньооб'ємної температури середовища протягом часу горіння. Практика та проведені наукові дослідження показали, що температурний режим при пожежі в приміщеннях залежить від кількості і властивостей горючих матеріалів, розмірів приміщення, умов теплогазообміну.

1.8.1. Експериментальні методи.

Експериментальний метод передбачає проведення повномасштабних вогневих випробувань при умовах стандартного температурного режиму пожежі, дані випробування представляють собою вартісні та громіздкі процедури. Експерименти проводять у вогневих печах протягом визначеного часового проміжку підтримуючи стандартний температурний режим [97,98]. Даний метод дозволяє досконало вивчити процеси та технології вогневого випробування та

сконцентрувати увагу на окремих параметрах дослідження, які представляють найбільший інтерес.

Під час проведення експерименту кожний конкретний процес слід досліджувати окремо. Такий підхід дозволяє частково встановити залежність між окремими показниками у чітко визначених часових інтервалах їх зміни. Аналізуючи показники змінних характеристик за границями цих часових інтервалів можна отримати спотворені залежності, що може призвести до грубих помилок.

Для визначенні фактичної межі вогнестійкості слід застосовувати вогневий метод випробувань, він надійний та більш достовірний. Під час застосування вогневого методу використовують вогневі нагрівальні печі та навантажувальні установки. Приклад розташування експериментального зразка у вогневій печі з метою подальшого випробування показано на рис. 1.5. [87,89,99-100].

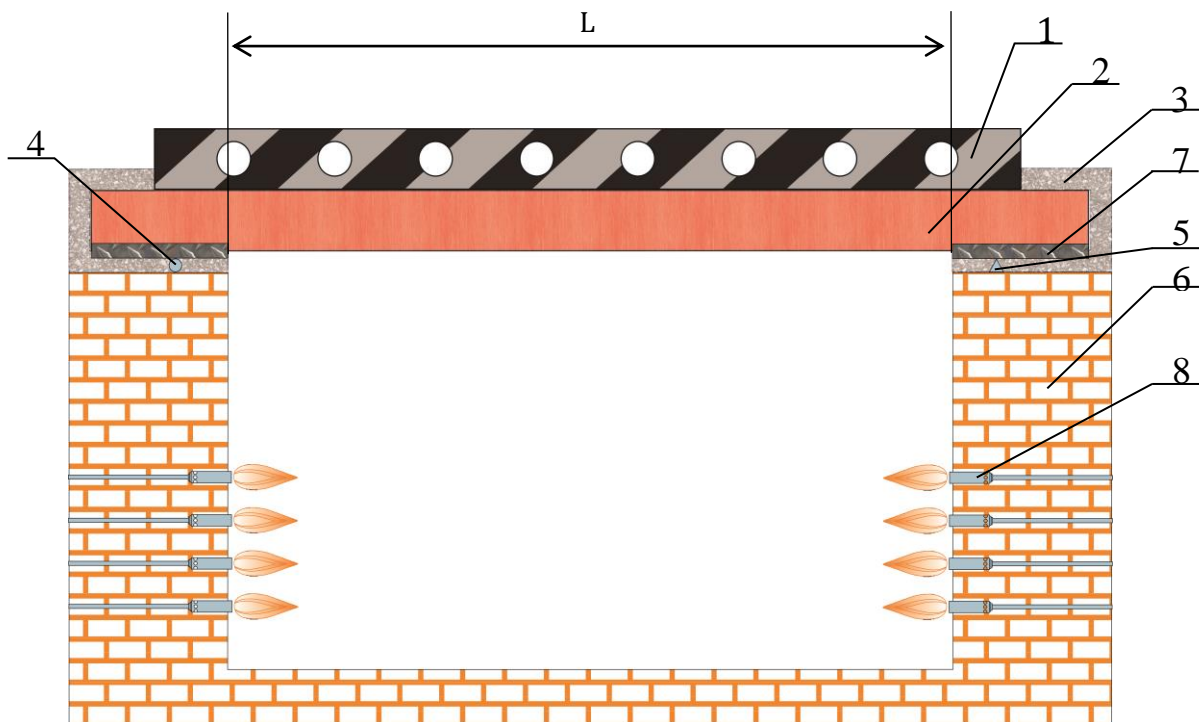


Рис. 1.5 Приклад розташування зразка в печі (вид збоку):

1 – плита перекриття; 2 – випробувальний зразок; 3 – ущільнення з мінеральної вати; 4 – рухома опора; 5 – нерухома опора; 6 – стіни; 7 – опорні пластини зі сталі; 8 – пальник. L – довжина зразка, яка піддається вогневному впливу.

Вогнестійкість будівельних конструкцій та їх елементів визначають у випробувальних печах за умов стандартного температурного режиму.

Вогнестійкість визначається, як час за який конструкція нагріваючись в умовах стандартного температурного режиму втрачає свої властивості та далі не може забезпечувати виконання будь якої із зазначених функцій (витримувати несуче навантаження, теплоізолювальну спроможність, огорожуючу здатність).

Час, який отримують при розрахунку конструкцій на вогнестійкість враховують разом з часовими показниками спрацювання автоматичних систем пожежогасіння, спрацювання пожежних сповіщувачів, прибуття до місця виклику пожежно-рятувальних підрозділів, а також часу необхідного для евакуації людей та ліквідації пожежі.

При експериментальному методі вогневих випробувань повинно враховуватися пожежне навантаження [87].

До основних факторів, що характеризують можливість розвитку процесу горіння при пожежі, відносять:

- пожежне навантаження;
- масова швидкість вигорання;
- лінійна швидкість поширення полум'я по поверхні;
- площа пожежі;
- площа поверхні горючих матеріалів;
- інтенсивність виділення тепла;
- температура полум'я.

Встановлено, що на початку нагріваються поверхневі шари стінки експериментального зразка, потім тепловий імпульс пошарово проходить далі та через деякий час проникає до середини стінки експериментального зразка. Далі спостерігається підвищення температури у всіх точках тіла (настання граничного стану втрати теплоізоляційних властивостей), і нарешті, вся стінка прогрівається до температури навколишнього середовища (настання граничного стану втрати цілісності). Підвищення температури тіла (ентальпія) означає збільшення кількості тепла, яке міститься в одиниці об'єму або маси тіла. Ентальпія тіла

спочатку підвищується швидко, потім швидкість набору тепла тілом уповільнюється, врешті решт температура у всіх точках тіла прирівнюється до температури середовища та залишається не змінною до моменту втрати несучої здатності. Саме таким способом відбувається прогрів та накопичування температури у дерев'яних будівельних балках прямокутного перерізу. За умови їх симетричного прогрівання підвищення температури тіла відбувається швидше, оскільки конструкція піддається обігріву по всьому периметру тіла.

Ентальпія стінки під час нагрівання також зростає, причому до початку підвищення температури поверхні стінки, все тіло набирає тепло, а потім частина цього тепла віддається поверхнею стінки за допомогою конвективного та променевого теплообміну в навколишнє середовище. При досягненні стаціонарного теплового режиму ентальпія стінки не змінюється. Зазначений процес нагрівання відбувається в стінках майже всіх нагрівальних установок, а також майже у всіх будівельних конструкціях під час пожежі. Описаний процес зміни температури тіла може відбуватися у всіх напрямках, проте загальне уявлення про ентальпію стінок та характер зміни температури тіла, що піддається обігріву, залишається незмінним.

Розв'язання задач нестационарної теплопровідності полягає у визначенні температури тіла T у будь-якій його точці з координатами $(x; y; z)$ в будь-який момент часу t . При цьому враховуються граничні умови 1-го, 2-го, та 3-го роду.

Рівняння нестационарної теплопровідності Фур'є може мати різний розв'язок, результат буде залежати від граничних умов протікання процесу нагрівання чи охолодження поверхні тіла.

Для визначення настання граничних умов втрати несучої здатності в проведенні вогневих випробувань використовують закономірності граничних умов третього роду Фур'є.

Аналітична методика розрахунку вогнестійкості полягає у чіткій задачі граничних умов, щодо розв'язку диференційного рівняння Фур'є, а також правильній постановці завдання щодо невідомих та відомих величин.

Дані, отримані шляхом проведення таких експериментів дозволяють розв'язати задачу “вогнестійкості” будівельних конструкцій (з певною точністю) та передбачити їх поведінку під час пожежі, але процедури при розв'язанні даної задачі достатньо трудомісткі і потребують багато часу для досягнення поставленої мети.

Таким чином, експериментальні методи мають свої переваги, але вказані недоліки часто ускладнюють розв'язок практичних завдань [87,89,97-99].

1.8.2. Розрахункові методи

З плином часу розрахункові можливості комп'ютерної техніки набувають все більшого розповсюдження та знаходять все більше галузей застосування, зокрема і моделювання процесів горіння та проведення складних математичних розрахунків. Завдяки цьому розрахункові методи визначення межі вогнестійкості можуть успішно застосовуватися, при цьому, виокристовуючи лише програмне забезпечення без виготовлення натурних зразків та застосування дороговартісних вогневих випробувань.

Розрахункові методи дослідження вогнестійкості передбачають проведення випробування за допомогою математичних розрахунків та опису закономірностей, що відбуваються в експериментальних зразках. Головною перевагою розрахункових методів є ціна проведення таких експериментів, але суттєвим недоліком на теперішній час залишається невисока точність, що становить приблизно 30 % [87,89,93,94].

Розрахункові методи включають в себе наступні підгрупи: табличний метод, метод кінцевих різниць, а також метод наближених розрахунків.

Температурний режим під час пожежі в приміщенні нестационарний і нестандартний, він змінюється доволно, тому не постійний у часі і коефіцієнт тепловіддачі. Крім того змінюється температура на поверхні стіни, протилежній пожежі. В загальному випадку маємо нестационарні і несиметричні граничні

умови третього роду, для яких аналітичний розв'язок рівняння нестационарної теплопровідності відсутній.

Для вказаних умов рівняння нестационарної теплопровідності, як правило, розв'язують чисельним або граничним методом кінцевих різниць.

Метод кінцевих різниць являє собою наближений метод розв'язання диференціального рівняння теплопровідності Фур'є [101-103]. В основі цього методу лежить припущення про можливість заміни, наприклад, в рівнянні теплопровідності, нескінченно малих змін температури у часі і просторі малими, але скінченними її змінами. Тим самим неперервний процес зміни температури в тілі при його нагріванні або охолодженні замінюється стрибкоподібним процесом.

Табличний метод ґрунтується на розробленні таблиць довідкових даних, які містять перелік вимог, виконання цих вимог забезпечує розрахункову межу вогнестійкості конструкцій.

Метод спрощених розрахунків дозволяє швидко і з наближеною точністю оцінити вогнестійкість будівельних конструкцій.

Метод уточнених розрахунків ґрунтується на розробці математичних моделей. Математичні моделі складаються з рівнянь, що описують основні процеси тепломасообміну та напружено-деформованого стану, рівнянь, які визначають граничні та початкові умови, коефіцієнтів. Розв'язавши цю систему рівнянь, ми вирішуємо аналітично складну задачу. Саме через це для моделювання впливу факторів пожежі на несучі конструкції варто використовувати різного роду програмні розрахункові комплекси, наприклад такі як Femap, ANSYS, Ліра. Уточнені методи розрахунку застосовують для визначення міцності та огорожувальної здатності. Уточнені методи мають забезпечувати можливість реального аналізу поведінки конструкцій під час пожежі. Вони враховують основні фізичні властивості конструкцій для досягнення максимально точного прогнозування їхньої поведінки під час пожежі.

Уточнені методи можливо використовувати для прогнозування поведінки як окремих елементів конструкцій, так і для прогнозування цілісних конструктивних систем будівлі. Уточнені методи застосовують для: визначення

глибини обвуглювання конструкції; визначення розподілу температури в елементах конструкцій (моделювання теплової реакції); оцінювання роботи будівельної конструкції чи її частини в умовах пожежі (моделювання конструктивної реакції відгуку).

Уточнені методи для розрахунку теплової реакції мають ґрунтуватися на теорії теплопровідності. Під час моделювання теплової реакції, необхідно враховувати теплові властивості матеріалів в залежності від зміни температури.

Розрахункові методи можна використовувати з метою оцінки вогнестійкості будь-яких будівельних конструкцій, винятком є ті конструкції, які слід розраховувати за граничним станом вогнестійкості по втраті цілісності конструкції. Також розрахункові методи використовуються для оптимізації конструктивних параметрів будівельних конструкцій, для забезпечення необхідної розрахункової вогнестійкості.

Розрахункові методи слід поділяти на два види:

- методи, в основу яких закладено використання математичних моделей теплового і напруженого станів конструкцій;
- номограмні методи.

За допомогою методів, що засновані на математичних моделях, розв'язавши задачу теплопровідності можливо визначити розподіл температури в середині будівельної конструкції в кожен конкретний момент часу від початку дії вогневого впливу на неї. Отримані температурні показники порівнюють з їхніми критичними значеннями. Проводячи розрахунки за допомогою математичних моделей, беруть до уваги ряд понижувальних коефіцієнтів які стосуються властивостей конкретних будівельних матеріалів. Але слід зазначити, що математичні моделі не враховують такі важливі фактори несучої спроможності: реальні діаграми розтягу і стиску при дії високих температур, фізична і геометрична нелінійність, усадка та повзучість матеріалів.

Застосовуючи номограмні методи межу вогнестійкості конструкцій визначають відповідно до графіків, таблиць, номограм, які отримують в результаті проведення вогневих випробувань чи шляхом проведення розрахунків.

Існуючі, на теперішній час, розрахункові методи не враховують наявність вогнезахисного облицювання будівельних конструкцій, а також питання наявності вогнезахисних просочувальних речовин та їх впливу на теплофізичні та механічні властивості дерев'яних несучих конструкцій. Також, дані методи не враховують характеристики міцності клейових з'єднань в елементах несучих конструкцій та не приділяють потрібної уваги залежності швидкості обвуглювання деревини від обраного вогнезахисту дерев'яних конструкцій.

Найбільш розповсюдженими є експериментально-розрахункові методи, оскільки вони спираються на дані, отримані в результаті проведених вогневих випробувань, для достовірності отриманих даних достатньо випробувати два експериментальні зразки. Після проведення випробувань, використовуючи розрахунковий метод, проводять необхідну кількість експериментів.

Основа розрахунків повинна базуватися на застосуванні розрахункової моделі (дану модель доповнюють результатами вогневих випробувань). Для того, щоб з належною точністю, передбачити реальну роботу конструкції, математичні моделі повинні бути достовірними, відповідати високому рівню якості і гарантувати надійність інформації, на якій ґрунтуються розрахунки.

Межу вогнестійкості несучих будівельних конструкцій визначають за ознакою втрати несучої здатності, для цього застосовують розрахунковий метод.

Розрахункові значення несучої здатності елементів з клеєної деревини повинні відповідати нижче викладеній методиці розрахунку, описаній у [87,89].

У безрозмірному вигляді з облицювальним шаром, який знаходиться під дією теплового потоку, визначається виразом:

$$e^{\theta} = \frac{a}{ch^2\left(b - \xi \sqrt{\frac{a\delta}{z}}\right)}, \quad (1.6)$$

При заданих температурах стандартним температурним режимом на поверхні шару облицювання для несиметричності задачі граничні умови будуть наступні:

при $\xi=0$; $\theta=0$; а при $\xi=2$; $\theta=0$, можна визначити параметри δ і θ з константами інтегрування a і b :

$$b = \operatorname{arch}\sqrt{a}, \quad (1.7)$$

$$\delta = \frac{\Phi^2}{2a}, \quad (1.8)$$

$$\Phi = \operatorname{arch}\sqrt{a \cdot e^{\theta_0}} + \operatorname{arch}\sqrt{a}, \quad (1.9)$$

Якщо провести диференціювання рівняння (1.5.) за параметрами a і прирівняти отримане значення 0, отримаємо вираз, який пов'язує a і θ_0 в разі симетричного теплообміну поверхонь пластини:

$$\frac{1}{\sqrt{a(a-1)}} + \frac{e^{\theta_0}}{\sqrt{a \cdot e^{\theta_0} \{a \cdot e^{\theta_0} - 1\}}} - \frac{\Phi}{a}, \quad (1.10)$$

У зв'язку з тим, що на одній стороні шару облицювання підтримується постійна висока температура ($Bi \rightarrow \infty$), а умови $ab > 2$, то вираз набуває вигляду:

$$\delta_{\text{кр}} = \frac{1}{2a} \left(\frac{Bi}{1+2Bi} \right) \left(\theta_0 + 2 \ln \left[2 \left(a + \sqrt{a(a-1)} \right) \right] \right)^2, \quad (1.11)$$

де $a = 1 + 2,28e^{-0,65\theta_0}$.

При цьому величина шару поверхні вогнезахисної фанери, у якій проходить процес втрати маси (вигорання) під дією теплового потоку, можна отримати з рівняння:

$$\delta = \delta_{\text{кр}} \cdot (1 + \beta) \cdot f(x), \quad (1.12)$$

де $\delta_{кр}$ – критична товщина шару облицювання вогнезахисною фанерою при несиметричному теплообміні, в якій під дією тепла відбувається процес піролізу з видаленням горючих газів (при $\beta > 0$, $x = 0$), мм;

β – параметр, що характеризує горіння матеріалу;

x – параметр, який характеризує вигорання матеріалу.

Враховуючи те, що процес нагрівання вогнезахисної фанери проходить при відносно великих температурах, критерій Bi розраховується з урахуванням втрати тепла за допомогою сумарного коефіцієнта тепловіддачі α :

$$Bi = \frac{\alpha h}{2\lambda}, \quad (1.13)$$

де λ – теплопровідність фанери, $Bm/(m.K)$;

h – товщина шару фанери, мм.

Вогнезахисне облицювання дерев'яних балок може призводити до зменшення горючих газів під час піролізу майже в 4 рази та збільшення кількості летких негорючих компонентів (CO_2 , N_2) [87,101].

Оскільки балка – це з'єднувальний елемент для вузлів з використанням цвяхів, гвинтів, скоб, зубчастих пластин, шпонок, то миттєвий модуль ковзання для площини зсуву на кріпильну деталь при експлуатаційному навантаженні наведено в таблиці 1.11.

Таблиця 1.11. – Значення модулю ковзання для кріпильних деталей з'єднань панелей на основі деревини та деревини

Тип кріпленої деталі	Модуль ковзання
Нагелі, болти без допуску, гвинти, цвяхи (з попереднім просвердлюванням)	$1,3^{1,5}d/23$
Цвяхи (без попереднього просвердлювання)	$1,3^{1,5}d^{0,8}/30$
Скоби	$1,3^{1,5}d^{0,8}/80$
Металеві зубчасті пластини	$1,3d/2$
Металеві зубчасті шпонки	$1,5 \times 1,3d/4$

Таким чином, проведення досліджень за допомогою експериментально-розрахункових методів дозволить більш ефективно встановити залежності швидкості горіння поверхні фанерної плити від наявності вогнезахисної речовини, при цьому вогнезахисна фанера, яка є елементом вогнезахисного облицювання дерев'яних балок, сповільнює початок термодеструкції випробувальних зразків.

1.9. Мета і завдання дисертації

З розвитком будівництва і широким використанням дерев'яних конструкцій в більшості елементів будинків та споруд, постає актуальним питання про забезпечення нормованої межі вогнестійкості дерев'яних конструкцій шляхом дослідження нових способів вогнезахисту. Мета даної роботи полягає у розкритті закономірностей залежності конфігурації зони обуглювання дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери від конструктивних параметрів та часу експонування за стандартним температурним режимом, що є основою для створення ієрархії методів прогнозування поведінки дерев'яних балок такого типу. Для досягнення поставлених цілей були сформувані такі завдання:

- провести аналіз статистичних даних щодо пожеж в Україні за останні роки, а також аналіз вимог нормативної бази України щодо вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисними системами та без них;

- розробити методика експериментальних досліджень на основі вогневих випробувань фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням та без нього на основі облицювання просоченою фанерою в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом часу в межах діапазону стандартних класів вогнестійкості для даного типу балок;

- на основі проведених експериментальних досліджень розробити методика інтерполяцій обугленої зони в перерізах дерев'яних балок із

вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери із використанням узагальненого математичного описання за допомогою ліній Без'є;

- дослідити закономірності залежності геометричних параметрів обвугленої зони та межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери від конструктивних параметрів балок та часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі;

- розробити ієрархічну систему методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок, облицьованих вогнезахисною фанерою, на основі створених довідникових таблиць, номограм та математичного описання геометрії обвугленої зони цих балок.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ

2.1. Номенклатура проведення вогневих випробувань дерев'яних балок на вогнестійкість

Згідно з [23], балки – це горизонтально орієнтовані несучі будівельні конструкції, ширина у яких менша за висоту або дорівнює їй. Дослідження балки на вогнестійкість, випробувальним методом полягає у визначенні часового проміжку від початку вогневого впливу до настання граничного стану вогнестійкості балки.

Випробування повинні проводитися у випробувальних печах, в яких забезпечено створення температурного режиму, надлишкового тиску, умов спирання, кріплення та навантаження зразка згідно з вимогами [23]. Для випробування балок необхідно виготовити два однакових зразки. Згідно з [23] випробувальні зразки балок слід випробовувати під навантаженням. Проте випробування металевих балок з вогнезахисним облицюванням чи покриттям, а також зразки дерев'яних балок, для яких відсутня можливість відтворити умови навантаження через технічні умови випробувальної лабораторії – допускається випробовувати без навантаження. Випробувальні зразки для дослідження вогнестійкості виготовляються замовником випробувань у відповідності з вимогами і технологіями, які висуваються до виготовлення реальної конструкції, що використовується в будівництві.

Розміри зразків для випробування повинні відповідати проектним розмірам будівельних конструкцій. Якщо випробувальні зразки реальних розмірів, через технічні причини розмірів випробувальної камери дослідити неможливо, допускається випробування фрагментів зразків будівельної конструкції. При цьому довжина фрагменту зразка, яку піддають вогневому впливу, має бути не меншою ніж 1000 мм для зразків, що досліджують без

прикладання навантаження та більшою від 4000 мм для зразків, які досліджують з додаванням навантаження.

Вологість зразків повинна відповідати технічним умовам та вимогам [24], а також бути врівноваженою з навколишнім середовищем і дорівнювати від 45 до 75 % при температурі від 5 до 40 °С. Щоб отримати відповідні показники вологості випробувальних зразків допускається використовувати як штучне так і природне сушіння при температурі повітря, яка не повинна перевищувати 60 °С.

Згідно з [23] для дерев'яних зразків, які досліджують без навантаження, є необхідність рівномірного встановлення термопар, які розташовують посередині випробувального зразка у напрямках двох осей його перерізу з метою отримання показників температурних розподілів. Для зразків дерев'яних балок слід встановлювати не менше трьох термопар, вони встановлюються рівномірно по довжині зразка, яка знаходиться найближче до нижньої поверхні зі сторони вогневого впливу.

Встановлення термопар у випробувальному зразку. Встановлення термопар відбувається у визначених місцях у спеціальних трубках, які встановлюють з необігрівного боку випробувального зразка, під час його виготовлення. Інший спосіб вставлення термопар дозволяє встановлювати їх через спеціальні отвори на зразку, які утворюють у визначених місцях під час виготовлення випробувальних зразків. Вимірювальний спай термопар закріплюють у випробувальному зразку дотримуючись вимог [23,24]. Термопари встановлюються на внутрішній нижній поверхні правої або лівої полиці балки, при цьому першу термопару встановлюють у центрі прогону балки, а дві інші – по краях, на відстані від краю $300 \text{ мм} \pm 25 \text{ мм}$ від центра прогону.

Установлення зразка у печі. Перед встановленням випробувального зразка у піч, його треба сфотографувати. Зразок для випробування встановлюють у піч відповідно до вимог технічної документації. Щоб запобігти виходу гарячих газів з об'єму випробувальної печі кінці зразка, які знаходяться за межами вогневої камери, потрібно ізолювати. Ізоляція виступаючих зразків виконується

шаром мінеральної вати, яка має товщину $100 \text{ мм} \pm 10 \text{ мм}$ та густину $120 \text{ кг/м}^3 \pm 30 \text{ кг/м}^3$.

Початок вогневого випробування. Всі процедури і технологічні процеси перед початком випробувань повинні відповідати вимогам [24].

Вимірювання та спостереження під час проведення випробування. Вимірювання температур випробувального зразка фрагмента дерев'яної балки, а також температури у вогневій печі, вимірювання надлишкового тиску у вогневій камері, спостереження за рівнем деформацій та поведінкою зразка в умовах високих температур проводять до моменту настання граничного стану будівельної конструкції, яку піддають випробуванню відповідно до вимог [24].

Граничний стан вогнестійкості для несучих балок [85] визначається за ознакою втрати несучої спроможності (умовне літерне позначення R), що передбачає виникнення граничних деформацій несучої конструкції, можливе обвалення будівельних конструкцій.

За результатами проведених вогневих випробувань складається база даних відповідповідних показників отриманих в результаті проведеного експерименту.

- виконавець (випробувальні центри) з зазначенням юридичної адреси, номер ліцензії, атестат акредитації лабораторії, лист заявки на проведення випробувань;

- об'єкт випробувань з реєстраційним номером;

- метод визначення вогнестійкості з розкриттям та обґрунтуванням кількості зразків та настання яких граничних станів було досягнуто;

- фото зразків до випробувань, фото зразків з розташованими термопарами, фото зразків після випробувань;

- опис та схема розміщення термопар у зразках;

- регламент та умови проведення випробувань;

- опис засобів випробувань та засобів вимірювальної техніки;

- таблиці та графіки отриманих результатів температурних залежностей від часу та хронологічний опис поведінки зразків;

- висновки.

2.2. Експериментальне обладнання та матеріали

2.2.1. Обладнання та матеріали для виготовлення зразків-фрагментів дерев'яних балок. Зразки для проведення вогневих випробувань було виготовлено із суцільного соснового бруса розміром 70×250×350 мм, плити OSB-3 Kronospan 350×350 мм товщиною 18 мм, сухого лущеного березового шпону другого сорту товщиною 2 мм, сертифікованого в Україні вогнезахисного розчину фірми «Композит БС-13», технологічних ванни, сушильної камери, електровологоміру, підібраного клею на основі епоксидних смол фірми «Епокси» з діапазоном робочих температур від – 50 °С до 120 °С, термопрес [104].

2.2.2. Обладнання для проведення вогневих випробувань. Для дослідження впливу деревини з облицюванням вогнезахисною фанерою на вогнестійкість було використано наступне обладнання: установка для проведення вогневих випробувань [23-24,105-107] схематичне зображення якої подано на рис. 2.1; хромель-алюмелеві термопари ТХА-VIII рис.2.3 у комплекті із DigitalmultimeterDT 700 °С і DigitalmultimeterDT 838 °С; пальник.

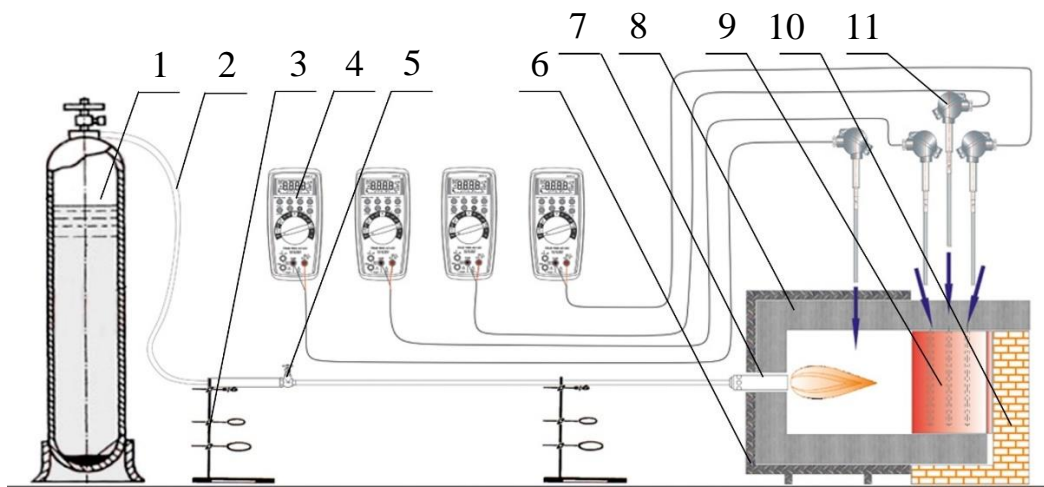


Рис. 2.1 Експериментальна установка для вогневих випробувань зразків-фрагментів дерев'яних балок: 1 – балон, наповнений газом; 2 – рукав; 3 – штатив; 4 – мультиметр; 5 – вентиль з інжектором; 6 – сталевий корпус печі; 7 – газовий пальник; 8 – теплоізоляція камери теплового впливу печі; 9 – зразок для дослідження; 10 – кирпичний корпус печі; 11 – термопари.

Установка для проведення вогневих випробувань представляє собою камеру зі сталевому корпусу з розмірами 500×500×500 мм, що має отвір діаметром

60 мм для встановлення газового пальника. Для зменшення втрат теплоти корпус камери для випробування захищений за допомогою негорючої теплоізоляції товщиною 100 мм «Conlit 150» фірми «Rockwool». Підвищення температури в камері випробувальної печі виконувалося за допомогою газового пальника ГВ «ДОНМЕТ». Регулювання температури у випробувальній камері відбувалося шляхом регулювання інтенсивності подачі газу, яку змінювали за допомогою регулятора, таким чином підтримуючи необхідний температурний режим для проведення вогневих випробувань. Пальник ГВ «ДОНМЕТ» складається з газового балону, гумового рукава та стовбура. Газ потрапляє в пальник по гумовому рукаву (тип I по ГОСТ 9356-75), проходить через інжектор, патрубок, вентиль, ніпель, мундштук. Процес проведення вогневих випробувань на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Проведення вогневих випробувань.

Під час всього періоду проведення вогневого випробування проводилося спостереження за цілісністю зразка. Температури в камері вогневої печі, а також температурні показники в середині випробувального зразка з трьох термопар реєструвалися щохвилини, у визначених експериментальною програмою часових проміжках (15 хв, 30 хв, 60 хв). Для вимірювання температури в печі використовувалися хромель-алюмелеві термопари з діаметром дроту 1,5 мм, що зображені на рис 2.3, технічні характеристики обраних термопар дозволяють реєструвати температурні показники в діапазоні від 0°C до 1100 °C.

Для фіксації числових показників температури в місцях установки термопар застосовувалися вторинні електронні прилади Digitalmultimeter DT 700C і Digitalmultimeter DT 838C, що були підключені до термопар. Діапазон вимірювання температури зазначеним приладом становить від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ з похибкою вимірювання $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$



Рис.2.3. Термопара ТХА 1-27-К-2-И-320-INC-6-А-(0...1100) $^{\circ}\text{C}$

Для детального дослідження зразків-фрагментів дерев'яної балки, що були піддані вогневому випробуванню, використовувалося обладнання, що перераховане в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. – Обладнання для дослідження зразків-фрагментів дерев'яної балки після проведення вогневого випробування

№ п/п	Найменування обладнання або приладу	Заводський номер	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювань
1.	Лінійка металева	-	від 0 до 500 мм	± 1 мм
2.	Штангенциркуль типу ШЦ - I	00913574	від 0 до 125 мм	$\pm 0,05\%$
3.	Рулетка		від 0 до 8 м	клас точності 3
4.	Психрометр аспіраційни МВ-4М	4507	від -25 до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ від 10 до 100%	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 4\%$
5.	Секундомір механічний типу СОС пр.-2Б-2-000, 4295 В	0779	від 0 до 60 с. від 60 до 3600 с	$\pm 0,6$ с. $\pm 1,8$ с.
6.	Термопара ТХА 1-27-К-2-И-320-INC-6-А		від 0 до 1100 $^{\circ}\text{C}$	клас допуску 2

2.3. Методика виготовлення зразків – фрагментів дерев'яних балок, облицьованих вогнезахисною фанерою

На виготовлення зразків потрібних для проведення випробування було обрано суцільний сосновий брус розміром 70×350×250 мм, плита OSB-3 Kronospan 350×350 мм товщиною 18 мм, сушильна камера, електровологомір. Облицювання бруса проводилося виготовленою вогнезахисною фанерою із використанням сухого луценого березового шпону другого сорту, сертифікованого в Україні вогнезахисного розчину фірми «Композит», підібраного клею на основі епоксидних смол фірми «Епокси» з діапазоном робочих температур від 50 °С до 120 °С, використовуючи термопрес, що і стало першим етапом у виготовленні експериментальних зразків [104].

Спосіб виготовлення вогнестійкої фанери включає просочування антипіреном у холодних ваннах листів луценого шпону, їх сушіння, нанесення клею, формування пакетів шпону, пресування шпону термопресом. Складність технології виготовлення вогнестійкої фанери полягає в тому, щоб просочити листи шпону за всією товщиною, а сушіння листів шпону сприяє висолюванню антипіренів, цей процес призводить до кристалізації солей на зовнішніх поверхнях шпону, досить часто і до значного його жолоблення, що може призвести до руйнування клейових шарів і погіршення механічних властивостей майбутніх листів фанери [108-111].

Поставлене завдання розв'язується завдяки використанню клеїв на основі епоксидних смол – для склеювання, а також застосуванням капілярно-дифузійного методу просочування листів шпону [112-115]. Метод капілярно-дифузійного просочування полягає у тому, що листи луценого шпону з вологістю 7-10 % опускали у гарячу ванну з просочувальним вогнезахисним розчином та температурою 80-90 °С, очікували 30 хв, потім листи просоченого шпону переміщали з гарячої ванни у холодну, з температурою просочувального розчину 20 °С та очікували 40 хв. Далі просочені листи луценого шпону діставали з ванни, розміщували їх над ванною з метою стікання надлишків просочувального

розчину назад у ванну і складали в стоси із взаємно-перпендикулярним напрямком волокон шпону в суміжних шарах для перерозподілу антипіренів у просочених листах, тобто дифундування солей у середину з поверхні. У вказаному режимі листи просоченого лущеного шпону перебували впродовж 1 години. Потім, їх піддавали сушінню до вологості 8 %, наносили клей, формували пакети для склеювання, підпресовували та пресували листи вогнезахисної фанери.

У якості вогнезахисту для просочування шпону було використано речовину просочувальну вогнебіозахисну «Вогнезахист F1» для дерев'яних конструкцій (Висновок санітарно-епідеміологічної експертизи від 16.03.2018 р. № 602-123-20-1/10965). В якості речовини для склеювання було обрано клей епоксидний «Хімконтакт -Епоксі» [116-118].

Семи шарову фанеру, товщиною 10 мм, виготовляли в умовах промислового фанерного виробництва з дотриманням таких режимних параметрів: температура у пресі – 120-125 °С, робочий тиск у пресувальній установці – 1,8-2,0 МПа, час пресування – 10 хв., розхід клею – 120 г/м² [119-120].

Другим етапом виготовлення зразків була сушка суцільного дерев'яного бруса розмірами 250x350x70 мм. Сушіння бруса виконувалося на відкритих майданчиках до моменту досягнення вологості у ньому не більше ніж 20 %, оскільки високий вміст вологості суттєво знижує займістість деревини та допомагає зберігати природну захисну дію. За даними [86-87], для досягнення температури займання (270 °С) для 1 кг деревини, показник вологості якої відповідає – 20 %, потрібно витратити теплоти у 1,73 рази більше, якщо порівнювати з показниками абсолютно сухої деревини. Вологість зразків визначали вологоміром згідно з ГОСТ 20022.14 – 84.

Третім етапом виготовлення зразків (рис.2.4) було безпосереднє облицювання суцільного дерев'яного бруса вогнезахисною фанерою, товщиною 10 мм та 20 мм. У якості елементів кріплення використовували саморізи для дерев'яних конструкцій. Облицювання здійснювали відповідно до [105,121].

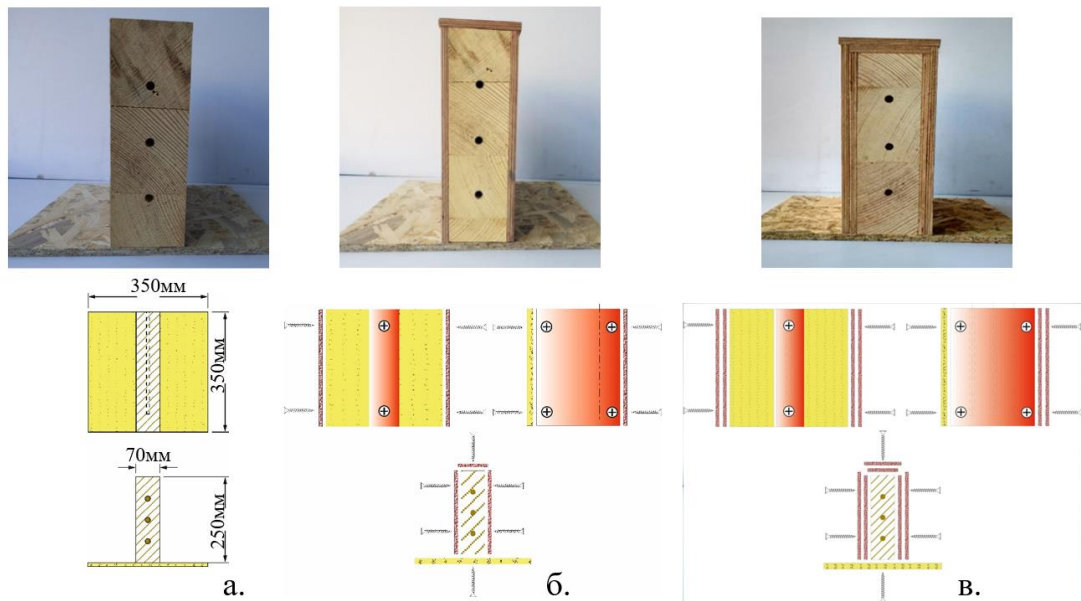


Рис. 2.4. Загальний вигляд експериментальних зразків: а) без облицювання; б) з шаром облицювання – 10мм; в) з шаром облицювання – 20мм.

2.4. Методика попередніх досліджень поведінки зразків-фрагментів дерев'яних балок не захищених та захищених шляхом їх облицювання вогнезахисною фанерою

Випробування проходило на відкритому майданчику при ясній безвітряній погоді зберігаючи таку послідовність процесів.

1. Підготовчі процедури:

- установлення термопар у випробувальному зразку в кількості 3 шт. (За 2 дні до випробування);
- монтаж випробувальної установки, з'єднання пальника з балоном, установка пальника на штатив;
- встановлення зразка у випробувальну установку, виконання теплоізоляційних робіт, облаштування отворів для видалення продуктів горіння;
- монтаж приладів вимірювання до термопар та їх налаштування.

2. Проведення експерименту:

- забезпечуємо подачу газу до пальника за допомогою відкриття вентиля балона, регулятором контролюємо інтенсивність подачі газу , підпалюємо газ;

- паличник встановлюємо у отвір випробувальної камери, вмикаємо секундомір, перевіряємо чутливість терморпарі, яка розташована у середині печі;
- за допомогою регулятора на першій хвилині та подальших підтримуємо температуру в середині випробувальної камери максимально наближену до температури стандартної пожежі у відповідності з ДСТУ Б В.1.1-4-98 [24];
- щохвилини знімаємо показники вимірювальних приладів і заносимо їх до протоколу протягом всього терміну випробування (15 хв, 30 хв, 60 хв);

3. Закінчення експерименту:

- охолодження випробувального зразка;
- дослідження поверхні випробувального зразка зовнішнім оглядом з фотофіксацією, дослідження включає: опис стану зразка, зняття замірів шарів обвуглювання на кожній ділянці зразка, як вказано на рис.3.5;
- розбирання установки;
- обробка отриманих результатів та занесення даних в програмний продукт Mathcad.

2.5. Методика реалізації теплових режимів нагріву зразків

Щоб відтворити випробування зразків-фрагментів за методикою пункту 2.4 необхідно отримати відповідність прогріву серединної точки прямокутного зразка розрахованому режиму. Під час проведення випробування потрібно розрахувати коефіцієнт теплообміну між обігрівною поверхнею випробувального зразка та простором обігрівної камери випробувальної установки, врахувавши необхідний режим прогріву печі, підібраний раніше.

Згідно з [23-24,85,88,107] будівельні конструкції повинні відповідати граничним станам вогнестійкості REI:

- несучі: граничний стан вогнестійкості визначається та встановлюється за ознакою втрати несучої спроможності R;

- несучі та огорожувальні: граничні стани вогнестійкості визначаються за ознаками втрати несучої здатності – R та цілісності – E , в окремих вимагаємих випадках за втратою теплоізолювальної здатності – I.

Граничний стан вогнестійкості будівельної конструкції за ознакою втрати несучої спроможності та цілісності забезпечуються у тому разі, якщо ці показники для будівельної конструкції витримують навантаження протягом визначеного проміжку часу дії вогневого впливу.

Граничний стан вогнестійкості за показником втрати теплоізолювальної спроможності можна вважати таким що виконується, якщо підвищення середньої температури на всій площі необігрівної поверхні не досягає 140 К, а максимальне збільшення температури у будь-якій точці поверхні менше ніж 180 К.

Альтернативою проектуванню будівельних конструкцій за розрахунками може бути розрахунок вогнестійкості, який спирається на результатах вогневих випробувань, або на поєднанні розрахунків та результатів отриманих після проведених вогневих випробувань відповідно до (EN1990:2002, 5.2).

Знаючи коефіцієнти теплообміну обирається режим прогріву випробувальної камери печі. Цей режим здійснюється, контролюється та підтримується за допомогою термопар ТХА 1-27-К-2-И-320-INC-6-А-(0...1100)°С.

Враховуючи [23-25,122] під час проведення випробування середньооб'ємна температура в печі T_f повинна змінюватися за стандартним температурним режимом, який визначається залежністю (2.2).

Температурний режим пожежі на стадії розвитку виражається такою формулою:

$$T_p = T_0 + 345 \cdot \lg(8t + 1) \quad (2.1)$$

де: t – час вогневого випробування за умов стандартного температурного режиму, хв; T_0 – початкова температура, °С; $T_0 \approx 20$ °С; T – температура у камері випробувальної установки для визначення межі вогнестійкості будівельної конструкцій, що має залежність від часу стандартного випробування – t .

Температурний профіль у дерев'яних балках, експонованих за стандартним температурним режимом, рекомендується визначати за виразом:

$$T = T_0 + (T_p + T_0) \left(1 - \frac{x_c}{a_t}\right), \quad (2.2)$$

де x_c – відстань між основою вугілля та початковою поверхнею, мм;

a_t – глибина термічної проникності, мм.

Вимірювання температури [123] в дерев'яних балках з вогнезахисним облицюванням з хвойних порід деревини показало, що через вологість деревини – як правило 12% – умовна затримка підвищення температури до 100 °С стає порівняно коротшою. При цьому заміряна залежність від часу розподілу температури в поперечному перерізі елемента показана на рис. 2.5. Вказані графіки слугують для розрахунку межі вогнестійкості та відповідають різним породам деревини. Графік показує невелику температурну різницю, де температура до середини перерізу швидко знижуються. Зона розпаду – в межах температури 200 – 300 °С, зона обвуглювання при цьому вища за 300 °С.

На підставі досліджень [23-24,85,106-107,124-127] встановлено, що розподіл температури у разі двостороннього нагрівання відповідно до стандартної температурної кривої в поперечному перерізі можна визначити за формулою:

$$T(x) = 20^\circ + 180^\circ \left[\frac{V \cdot t_f}{x}\right], \quad (2.3)$$

$T(x)$ – температура залежно від глибини x , мм;

V – швидкість обвуглювання, мм/хв.;

t_f – тривалість пожежі, хв.

Приймаючи, що еюра ізотерм у порівняльних поперечних перерізах по висоті є однакова, [128] вводить коефіцієнт k (враховують вид вогневого навантаження) для спрощення визначення меж вогнестійкості для різних видів деревини, за умови, що час експонування становить 30 хв.:

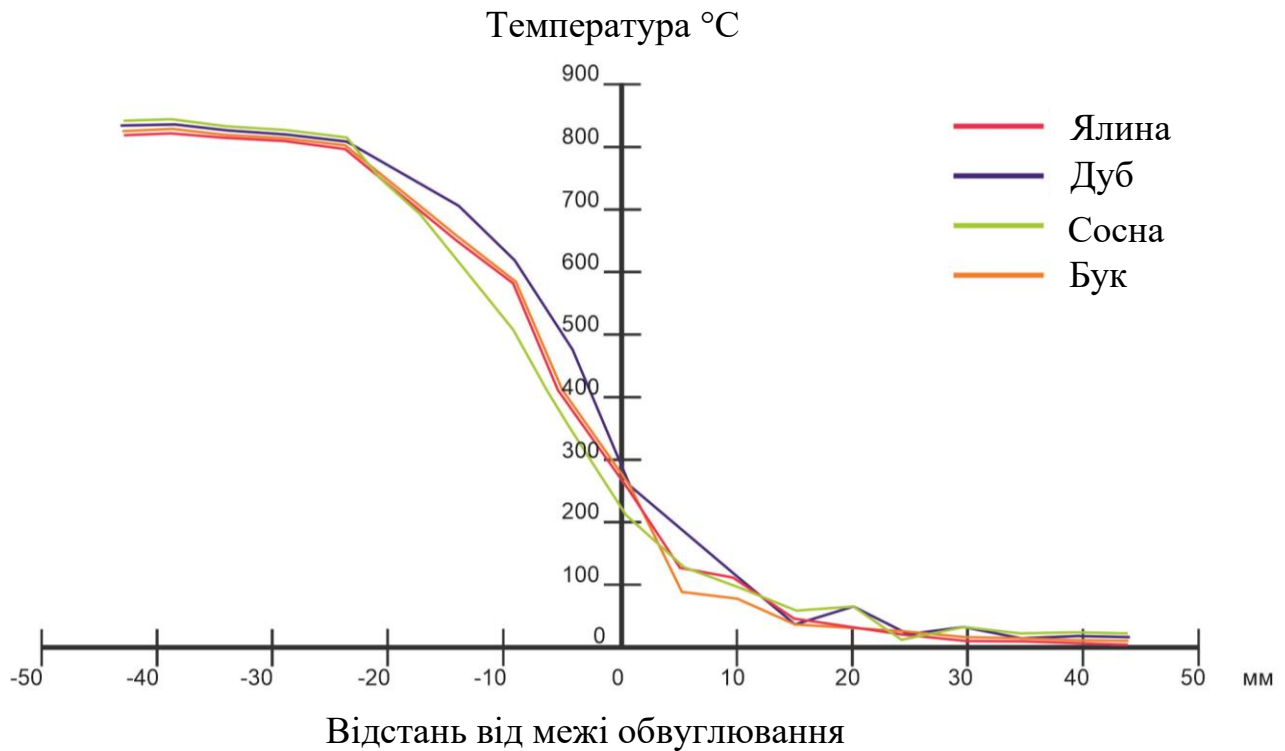


Рис. 2.5. Незалежний від часу температурний профіль у деревному вугіллі та деревині (ліва та права межі обуглювання) для різних порід та деревини під час нагрівання за режимом стандартної температурної кривої.

$$T = T_0 + T(x) \left(1 + k \frac{x_c}{a_t} \right), \quad (2.4)$$

де $k=0$ – з двостороннім обігрівом;

$k=0,25$ – з тристороннім обігрівом;

$k=0,4$ – з чотиристороннім обігрівом.

Під час проведення вогневих випробувань зразків-фрагментів не захищених дерев'яних балок, а також захищених балок за допомогою методу облицювання вогнезахисною фанерою, товщина якої становить 10 та 20 мм, на окремих термопарах після вогневого випробування протягом 10 хв допускаються відхилення температури від стандартного температурного режиму пожежі не більше ніж на 100 °C, що висвітлено на графіках рис. 2.6.

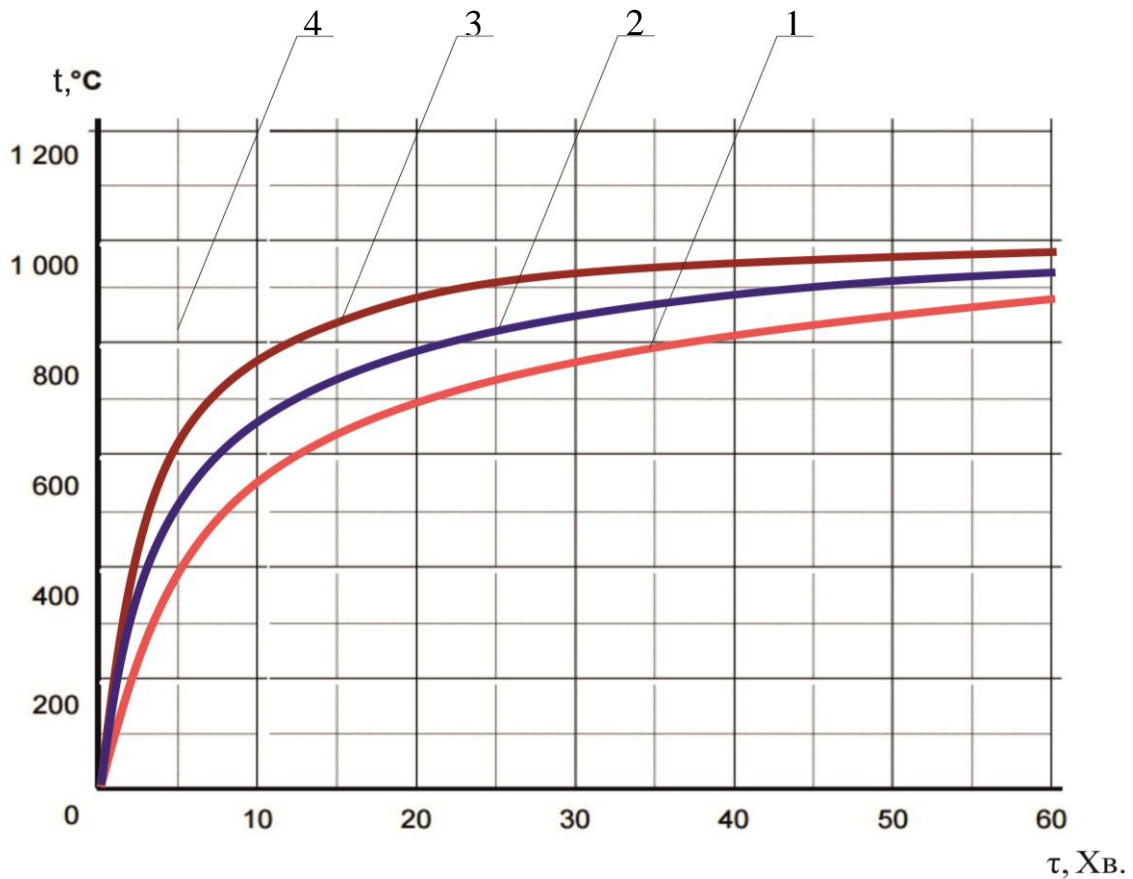


Рис. 2.6. Стандартний температурний режим: 1 – нижня межа допустимих значень температури під час вогневого випробування; 2 – стандартний температурний режим; 3 – верхня межа допустимих значень температури під час вогневого випробування; 4 – часовий проміжок, протягом якого відхилення середньої температури не контролюване.

Температурні показники у вогневій камері випробувальної печі підтримувалися у відповідності до графіку стандартного температурного режиму пожежі. Процес регулювання температури у вогневій камері відбувався за допомогою вентиля з інжектором, що дозволило правильно обрати режим інтенсивності подачі палива до газового пальника. Збільшуючи або зменшуючи інтенсивність подачі газової суміші потрібно слідкувати за температурними показниками в камері теплового впливу та підтримувати їх для забезпечення стандартного температурного режиму. Температурні відхилення, розраховані за формулою (2.5) не повинні перевищували допустимих значень вказаних у [87, 129].

$$d = \frac{T_f - T_s}{T_s} \cdot 100\%. \quad (2.5)$$

де: T_f – температурні показники стандартної пожежі, °C; T_s – температурні показники реальної пожежі, °C;

Для отримання максимально достовірних результатів експерименту потрібно створити необхідні умови для прогрівання деревини, саме з такою метою камеру вогневого впливу випробувальної установки теплоізолюють. Теплоізоляцію камери вогневого впливу показано рис. 2.2.

Вогневі експерименти були проведені в чіткій послідовності відповідно до програми експериментальних досліджень, висвітленій у табл. 2.2.

Таблиця 2.2. – Номенклатура зразків-фрагментів для випробувань

№п/п	Номер зразка	Товщина вогнезахисту зразків фрагментів дерев'яних балок	Час випробувань в хвиликах
1	1.1.-1.3.	Вогнезахисне облицювання 10мм	15
2	1.4.-1.6.	Вогнезахисне облицювання 20мм	15
3	1.7.-1.9.	Без вогнезахисного облицювання	15
4	2.1.-2.3.	Вогнезахисне облицювання 10мм	30
5	2.4.-2.6.	Вогнезахисне облицювання 20мм	30
6	2.7.-2.9.	Без вогнезахисного облицювання	30
7	3.1.-3.3.	Вогнезахисне облицювання 10мм	60
8	3.4.-3.6.	Вогнезахисне облицювання 20мм	60
9	3.7.-3.9.	Без вогнезахисного облицювання	60

2.6. Висновки до розділу

Провівши аналіз вогневих випробувань можна зробити такі висновки:

1. Об'єктами для дослідження є зразки-фрагменти дерев'яних балок з шаром облицювання вогнезахисною фанерою товщиною 10 мм, 20 мм та без облицювання, випробувальні зразки виготовлені з соснового бруса розміром 70×250×350 мм, плити OSB-3 Kronospan розміром 350×350 мм та товщиною 18 мм.

2. Вогневі дослідження поведінки зразків-фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням проводилися у вогневій камері експериментальної установки відповідно до стандартного температурного режиму та номеклатури проведення вогневих випробувань протягом 15, 30, та 60 хвилин.

3. Для вимірювання і реєстрації температур випробувального зразка та камери експериментальної установки використано дві термомпари всередині печі та три термомпари всередині випробувального зразка дерев'яної балки, вимірювання температури реєструвалися вторинними електронними приладами «Digital multimeter».

4. По завершенню вогневого експонування, було проведено заміри кожного експериментального зразка і досліджено геометричні параметри зони обвуглювання зразків-фрагментів дерев'яної балки без вогнезахисту та з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери. Вимірювання величини залишкового робочого перерізу досліджувалося за допомогою штангенциркуля та мікроскопу біологічного «Биолам-Д-11», після розпилювання експериментальних зразків.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛИЦЮВАННЯ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ

3.1. Результати вогневих випробувань фрагментів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери

На теперішній час розвитку науки не можна вважати, що горіння – це суто хімічний або фізичний процес. Скоріше всього його можна вважати фізико-хімічним процесом. Початковим є хімічний етап окиснення, а другим етапом – фізичний процес, зокрема дифузії кисню для підтримання горіння системи в умовах існування трикутника горіння. Необхідно констатувати, що для вирішення даного напрямку плідно працювали видатні вчені, а саме: Кулешов М. М., Уваров Ю. В., Олійник О. Л., Пустомельник В. П., Беліков А. С., а також закордонні Lu W., Makelainen P., White Robert H., Wolgast R. [130-133].

Пожежну небезпеку вогнестійкої фанери складає процес, пов'язаний з термічним перетворенням фанери під дією теплового потоку (процесу вигорання матеріалу), процесу розповсюдження пожежі за рахунок поширення фронту полум'я поверхнею матеріалу.

У процесі досліджень вогневих випробувань при стандартній кривій, загорання вогнезахисної фанери у більшості випадків супроводжувалося появою полум'я, в якому просліджувалися екзотермічні реакції взаємодії газоподібних продуктів піролізу матеріалу з киснем. Полум'яне горіння вогнезахисної фанери обумовлюється тим, що вона виділяє горючі гази в такій кількості, що може відповідати нижній концентраційній межі займання. Стадія полум'яного процесу горіння, яке досліджувалося, на стадії 60 хвилинних випробувань є дифузія повітря в зоні хімічних реакцій взаємодії вогнезахисної фанери та дерев'яної балки. Нами досліджувалися всі етапи розповсюдження полум'я поверхнею вогнезахисної фанери, які відбуваються в площині матеріалу, описуючи процес обуглювання, коли наявність горючих газів в продуктах піролізу вогнезахисної фанери буде більшою за нижню концентраційну межу поширення полум'я.

Процеси займання і горіння в глибину целюлозовмісних матеріалів, або процеси вигорання, досліджувалися в багатьох роботах [134-137]. Процеси розповсюдження полум'я поверхнею цих матеріалів досліджувалися значно менше [138]. В той же час дослідженням, що описували б займання та горіння вогнезахищених матеріалів, присвячувалося мало уваги [139-142].

Вогнезахищена фанера, що є вогнезахисним облицюванням дерев'яних балок, складається з просочених шарів шпону. При дії на неї теплового потоку, який відповідає стандартній температурній кривій, за умови, що час експонування становить 15 хвилин, її прогрів здійснюється на глибину просоченої фанери, що супроводжується початком обвуглювання та розшарування, виходом продуктів розкладу просочувальної фанери на поверхню. Зазначені результати висвітлені на рис. 3.1. [143-145]

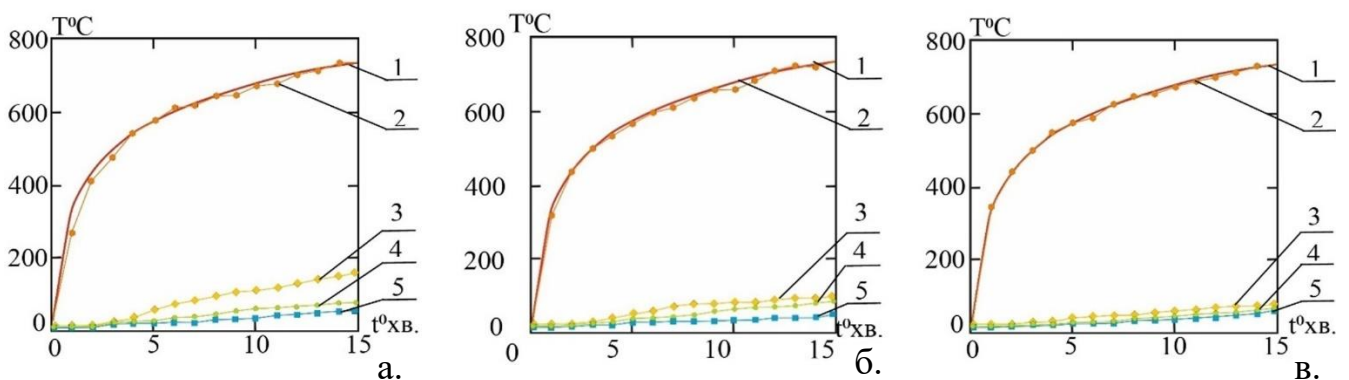


Рис. 3.1. Графіки що відображають залежність температури від часу вогневого випробування (термін експонування 15 хвилин): 1 – стандартна температурна крива; 2 – значення температури, що висвітлює температурний режим у вогневій камері установки; 3 – температурні показники на першій термопарі; 4 – температурні показники на другій термопарі; 5 – температурні показники на третій термопарі; а) зразки не захищені вогнезахисною фанерою; б) зразки захищені вогнезахисною фанерою товщиною 10 мм; в) зразки захищені вогнезахисною фанерою товщиною 20 мм.

Під час проведення комплексу 15-хвилинних вогневих випробувань, що відповідає температурі в діапазоні від 20 °C до 200 °C, здійснюється прогрів

вогнезахисної фанери на глибину, що визначає початок обвуглювання з одночасним виходом продуктів розкладу просоченого шпону на поверхню з наступним затвердінням вуглецевовмісних компонентів. В подальшому вогнезахисний шар вогнезахисної фанери спікається, проходить його усадка та розшарування, при цьому теплоізоляція перетворюється в тонку плівку і тепло переходить до дерев'яної балки. В досліджуваних зразках з вогнезахисним облицюванням вогнезахисною фанерою в 20 мм знижуються горючі властивості дерев'яної балки, що пояснюється утворенням теплозахисного шару.

З проведених досліджень в 15-хвилинному експонуванні не можна зробити прогноз ефективності вогнезахисних властивостей облицювання вогнезахисною фанерою, тому нами було проведено комплекс 30-хвилинних та 60-хвилинних вогневих випробувань, результати яких подано на рис. 3.2. та рис. 3.3.

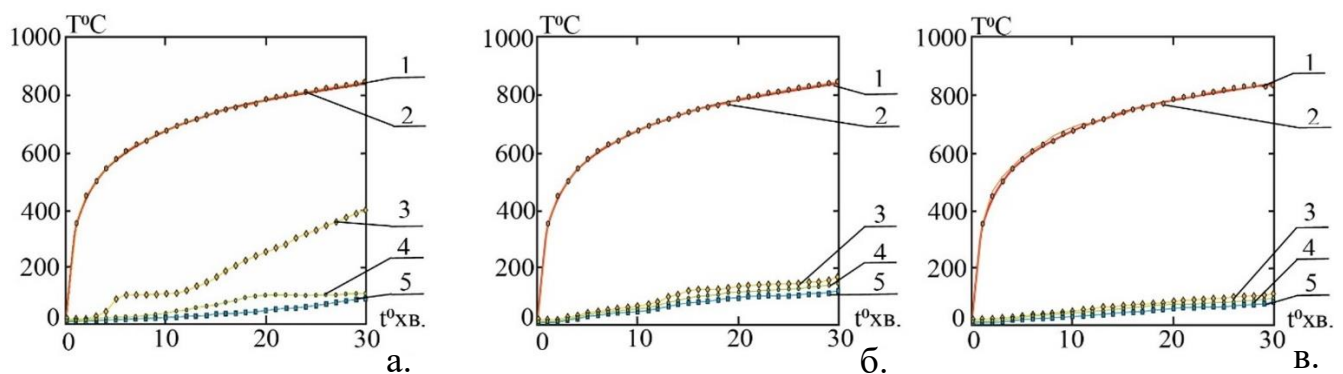


Рис. 3.2. Графіки що відображають залежність температури від часу вогневого випробування (термін експонування 30 хвилин): 1 – стандартна температурна крива; 2 – значення температури, що висвітлює температурний режим у вогневій камері установки; 3 – температурні показники на першій термопарі; 4 – температурні показники на другій термопарі; 5 – температурні показники на третій термопарі; а) зразки не захищені вогнезахисною фанерою; б) зразки захищені вогнезахисною фанерою товщиною 10 мм; в) зразки захищені вогнезахисною фанерою товщиною 20 мм.

Дані температурні залежності частково пояснюють вогнезахисну ефективність при облицюванні вогнезахисною фанерою товщиною як 10 мм, так

і 20 мм. При цьому теплозахисні властивості шару вогнезахисного просоченого шпону, який утворює вогнезахищену фанеру, що захищає від дії високих температур на поверхню дерев'яної балки, взаємопов'язані з умовою її формування та товщиною шару.

Оскільки деревина є пористим матеріалом з неоднорідною структурою, вона має низькі показники теплової активності та низькі значення густини, тому лише утворення ізолюючої, тобто облицювальної, перешкоди для виходу летких продуктів і переносу високих температур до фронту піролізу деревини в результаті перерозподілу теплових потоків на вогнезахищену фанеру може викликати ефект припинення горіння. Такою ефективною тепло-ізолюючою перешкодою є шар вогнезахисної фанери товщиною 20 мм.

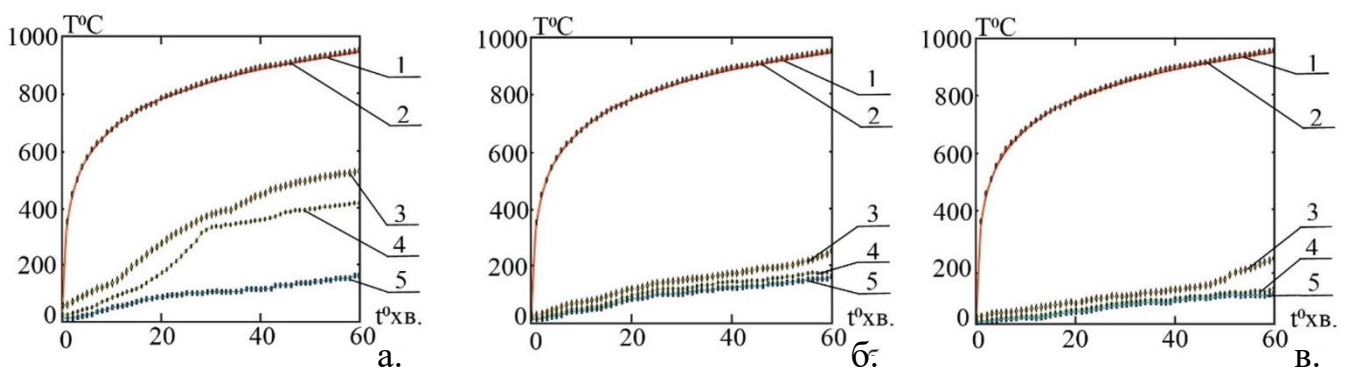


Рис. 3.3. Графіки що відображають залежність температури від часу вогневого випробування (термін експонування 60 хвилин): 1 – стандартна температурна крива; 2 – значення температури, що висвітлює температурний режим у вогневій камері установки; 3 – температурні показники на першій термопарі; 4 – температурні показники на другій термопарі; 5 – температурні показники на третій термопарі; а) зразки не захищені вогнезахисною фанерою; б) зразки захищені вогнезахисною фанерою товщиною 10 мм; в) зразки захищені вогнезахисною фанерою товщиною 20 мм.

Але дані дослідження не враховують в повній мірі зміну теплофізичних властивостей дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням вогнезахищеною фанерою під дією високих температур, до того ж розглядається тільки

теплопровідність, а необхідно враховувати динамічні процеси займання матеріалу. В блоці 60-хвилинних вогневих випробувань спостерігалися наступна поведінка зразків:

1. Зразки-фрагменти дерев'яних балок без облицювання поводити себе наступним чином: відбувалося швидке наростання температури на першій термопарі, яка розташована у випробувальному зразку найближче до вогневого впливу, а також і на другій термопарі, яка вимірювала показники температури в середині зразка. Варто зазначити, що максимальна температура першої термопари досягла позначки 599 °С, а третя зупинилася на 191 °С, отримані температурні показники висвітлено на рис. 3.3, а також під час експерименту спостерігалася значно більша задимленість від попередніх не захищених зразків, що пов'язано з часом випробувань. За зовнішнім оглядом експериментальні зразки на 80 % зазнали ушкоджень вогнем до утворення деревного вугілля.

2. Експериментальні зразки – фрагменти дерев'яних балок, облицьовані шаром вогнезахисної фанери товщиною 10 мм, під час експерименту показали, що наростання температури відбувалося поступово, максимальна температура на першій термопарі досягла 248 °С. Спостерігалася помірне виділення диму. Візуально зразки мали значно глибше обвуглювання від аналогічних зразків, які досліджувалися в 30-хвилинному часовому інтервалі.

3. Дослідження зразків – фрагментів дерев'яних балок, облицьованих шаром вогнезахисної фанери товщиною 20 мм, показало повільне наростання температури на встановлених термопарах, максимальна температура на першій термопарі досягла позначки 219 °С. Дані зразки виділяли менше диму порівняно зі зразками, облицьованими просочено фанерою товщиною 10 мм. Візуально фрагменти балки мали глибоке обвуглювання, але значно менше ніж у зразках з шаром вогнезахисного облицювання 10 мм. Ці дані вказують на залежність величини обвуглювання від товщини вогнезахисного облицювання і характеризують фанеру, як ефективний вогнезахисний засіб для захисту дерев'яних балок при пожежі. Вогнезахисна фанера може бути застосована, як пасивний вогнезахист для облицювальних вогнезахисних систем.

3.2. Вимоги норм та правил для визначення глибини обвуглювання дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери

В закордонних стандартах [86,106,111,122,146] викладена процедура визначення несучої здатності дерев'яних конструкцій, експонованих в тепловому режимі. За AS 1530.4 визначається залишкова площа несучого перерізу балки в наслідок обвуглювання, що вираховується для всіх видів деревини та облицювальних вогнезахисних панелей, які спочатку захищали несучу конструкцію, але обвуглювалися через певний час від початку пожежі.

При розрахунку глибини обвуглювання поверхні балок або іншого несучого конструктивного елемента, що захищені вогнезахисним облицюванням, слід враховувати наступне:

- початок обвуглювання затримується на час руйнування облицювання;
- обвуглювання може початися перед руйнуванням вогнезахисту, з швидкістю обвуглювання нижчою, ніж та, яка наведена в таблиці 3.1.;
- після руйнування вогнезахисту швидкість обвуглювання перевищує значення, наведені в таблиці 3.1.;
- коли глибина обвуглювання починає дорівнювати товщині облицювання або глибині обвуглювання подібного елемента без вогнезахисту, то швидкість обвуглювання повертається до значень, що наведені в таблиці 3.1.

Розподілу температури в середині досліджуваного елемента конструкції при нагріванні та займанні фанери прогнозується за допомогою математичного моделювання процесів теплообміну і базується на наступній математичній моделі:

$$\begin{cases} \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = Q \cdot \rho \frac{\partial n}{\partial t} + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{j}{x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H} = \alpha \cdot (T_\Gamma - T), \\ T(x, 0) = T_H; \quad q(x, 0) = 0; \end{cases} \quad (3.1)$$

де ρ – густина фанери, кг/м^3 ;

c – теплоємність фанери, Дж/(кг К);

T_r – температура фанери, К;

t – час від початку дії теплового потоку на вогнезахисне облицювання, с;

λ – теплопровідність фанери, Вт/(м К);

x – просторова координата, м;

j – коефіцієнт, що характеризує форми об'єму досліджуваної конструкції;

n – глибина проникнення реакції, яка залежить від швидкості вигорання матеріалу несучої конструкції, Дж/кг;

T – початкова температура матеріалу, К;

Q – тепловий ефект реакції окиснення, Дж/кг;

A – коефіцієнт теплообміну між поверхнею матеріалу й навколишнім середовищем Вт/(м² К).

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \varepsilon \rho_0 r \frac{\partial U}{\partial \tau};$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_1 \frac{\partial U}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(a_2 \frac{\partial U}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\delta a_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\delta a_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} \right), \quad (3.2)$$

Незахищені поверхні під час вогневого впливу

Визначення швидкості обуглювання для одновимірного обуглювання приймають сталою в часі. При цьому умовна швидкість обуглювання – це показник, що враховує ефект заокруглення кутів та наявність тріщин, і приймається сталим в часі.

Значення розрахункової швидкості обуглювання β_0 та β_n для дерев'яних поверхонь, не захищених під часу вогневого впливу, наведено в таблиці 3.1.

Припустимо $T(x, y, \tau)$ – температура, $U(x, y, \tau)$ – вологовміст у точці тіла з координатою (x, y) у момент часу τ . Для розв'язування системи диференціальних рівнянь (3.1) необхідно додати відповідні початкові та граничні умови, які зумовлені особливостями технологічного процесу склеювання шпону підвищеної вологості.

Початкові розподіли температури та вологовмісту вважатимемо рівномірними по цілому об'єму деревини:

$$T|_{n_{\tau=0}} = T_0; U|_{n_{\tau=0}} = U_0, \quad (3.3)$$

Таблиця 3.1.– Розрахункові швидкості обвуглювання β_0 і β_n для панелей на основі деревини, дерев'яної обшивки, листових пиломатеріалів та деревини

	β_0 , мм/хв	β_n , мм/хв
хвойні породи деревини тверда клеєна деревина з характеристичною щільністю $\geq 450 \text{ кг/м}^3$	0,50	0,55
листові пиломатеріали з характеристичною щільністю $\geq 480 \text{ кг/м}^3$	0,65	0,7
Панелі фанера	1,0*	-
* Значення наведені для товщини панелі 20 мм і характеристичної щільності 450 кг/м^3 ; для інших значень товщини і щільності.		

При визначенні швидкості обвуглювання для дерев'яних балок, наведених в таб.3.1., необхідно помножити на коефіцієнт k_2 . Коли дерев'яна балка захищена одним шаром (10 мм) вогнезахищеної фанери, тоді:

$$k_2 = 1 - 0,018h, \quad (3.4)$$

де h – товщина шару, мм.

Коли облицювання містить декілька шарів, тоді $h = 20$ мм, при цьому $k_2 = 1$.

Поверхні балок, попередньо захищені від вогневого впливу

Для вогнезахищеної фанери, яка складається з декількох шарів, час обвуглювання t_{ch} захищеної дерев'яної балки визначається як:

$$t_{ch} = \frac{h}{\beta_0}, \quad (3.5)$$

Для облицювання, яке складається з одного шару, зі стиками зсередини або суміжними по периметру заповненими стиками, час початку обвуглювання визначається за формулою:

$$t_{ch} = 2,8h - 14, \quad (3.6)$$

Руйнування вогнезахисного облицювання може відбуватися внаслідок:

- обвуглювання або механічної деградації матеріалу облицювання;
- недостатні довжини кріплення або проникнення в необвуглену деревину;
- невідповідної відстані та дистанції між кріпленнями.

Для вогнезахисного облицювання вогнезахищеною фанерою, закріпленою до дерев'яної балки, час руйнування визначається як:

$$t_f = t_{ch}, \quad (3.7)$$

Швидкість та глибину обвуглювання дерев'яної балки за умови натурального вогневого впливу розраховують методом «фактору отворів» з використанням параметричної кривої час – температура.

Для незахищеної дерев'яної балки використовують співвідношення між швидкістю обвуглювання β та часом t , як вказано на рис. 3.4.

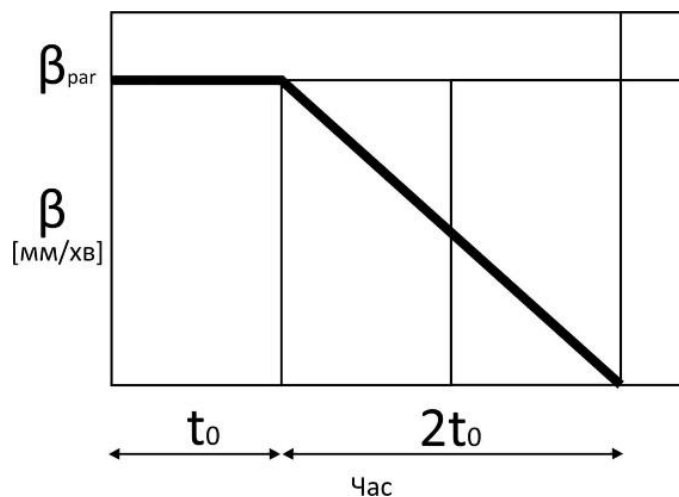


Рис.3.4. Співвідношення між швидкістю обвуглювання та часом.

Швидкість обвуглювання β_{par} протягом фази нагрівання в параметричній вогневій кривій визначають з виразу:

$$\beta_{par} = 1,5\beta_n \frac{0,2\sqrt{\Gamma-0,04}}{0,16\sqrt{\Gamma+0,08}}, \quad (3.8)$$

де β_{par} – умовна розрахункова швидкість обвуглювання, мм/хв.

Коефіцієнт Γ , який враховує теплові властивості поверхонь відсіку, має вигляд:

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2}, \quad (3.9)$$

де O – коефіцієнт впливу отворів, м^{0,5};

b – коефіцієнт поглинання.

При цьому глибину обвуглювання приймають як:

$$d_{char} = \begin{cases} \beta_{par} t & t \leq t_0 \\ \beta_{par} \left(1,5t_0 - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4}\right) & t_0 \leq t \leq 3t_0 \\ 2\beta_{par} t_0 & 3t_0 \leq t \leq 5t_0 \end{cases}, \quad (3.10)$$

Наведені вище залежності для визначення швидкості та глибини обвуглювання для параметричного вогневого впливу можна використовувати в таких умовах:

$$\begin{aligned} t_0 &\leq 40 \text{ хв}; \\ d_{char} &\leq \frac{b}{4}; \\ d_{char} &\leq \frac{h}{4}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

Фактичний залишковий переріз необвугленої частини балки, що сприймає навантаження отримують, шляхом знаходження різниці між розрахованою

фактичною глибиною обвуглювання та усією експонованою поверхнею дерев'яного несучого елемента.

Впливом кутів елемента під час обвуглювання нехтують.

3.3. Результати вогневого впливу та визначення оцінки глибини обвуглювання експериментальних зразків

Розрахункову глибину обвуглювання обраховують шляхом знаходження середньої величини глибин обвуглювання, що були визначені за вимірними параметрами шару обвуглення випробувального зразка. Для дослідження обвуглювання проведені експериментальні випробування, в якості об'єкту досліджень використовували фрагмент дерев'яної балки захищеної вогнезахисною фанерою товщиною 10 мм та 20 мм, виконаними згідно [147]. Фрагмент балки, обраний для проведення дослідження, висвітлено на рисунку 3.5.

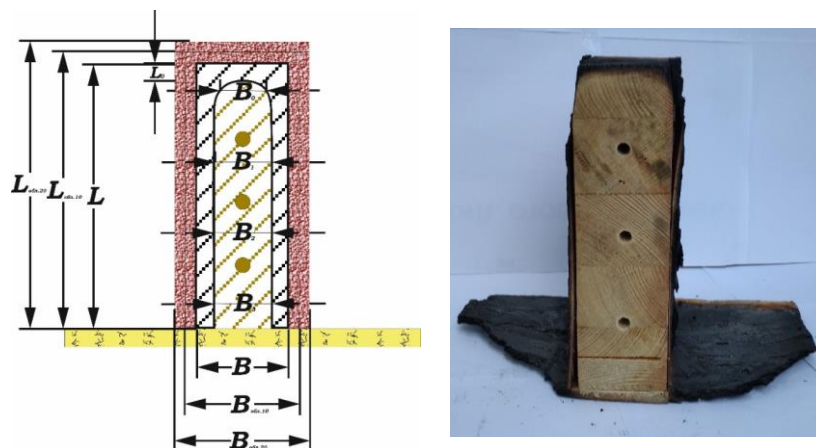


Рис. 3.5. Схематичне зображення ділянок для зняття замірів глибини обвуглювання на зразку: L – довжина зразка без облицювання перед випробуванням; $L_{обл.10}$ – довжина зразка перед випробуванням з вогнезахисним облицюванням товщиною 10 мм; $L_{обл.20}$ – довжина зразка перед випробуванням з вогнезахисним облицюванням товщиною 20 мм; L_0 – довжина обвугленої частини зразка; B_0, B_1, B_2, B_3 – ширина обвугленої частини зразка, після експерименту, на чотирьох рівновіддалених частинах цільного бруса, що імітує балку; B – ширина зразка без облицювання до проведення вогневого випробування; $B_{обл.10}$ – ширина зразка до початку випробування з вогнезахисним облицюванням 10 мм; $B_{обл.20}$ – ширина зразка до початку випробування з вогнезахисним облицюванням 20 мм.

В табл. 3.2. [147-150] висвітлено глибини обвуглювання випробувальних зразків після проведених вогневих випробувань, дані залежності підтверджують гіпотезу, що вогнестійкі властивості дерев'яної балки залежать від товщини шару вогнезахисного облицювання, властивостей облицювання і часу вогневого впливу на випробувальні зразки. Заміри глибини обвуглювання після випробування проводилися відповідно до рис. 3.5. за допомогою штангенциркулю та лупи.

Таблиця 3.2 – Значення товщини шару обвуглювання

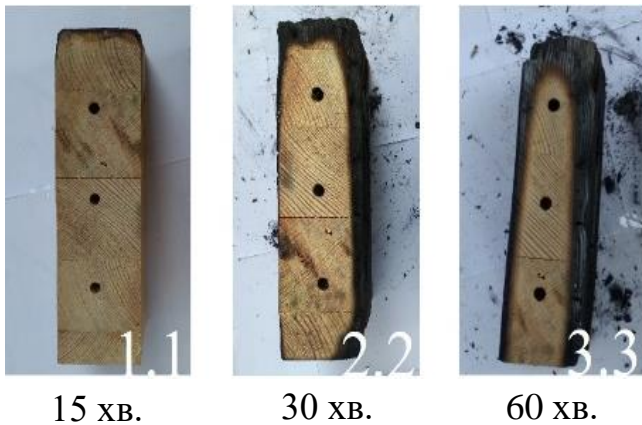
	Номер зразка	Час експонування хв	B ₀ мм	B ₁ мм	B ₂ мм	B ₃ мм	B мм	L ₀ мм	L мм
З 1 шаром вогнезахисної фанери	1.1.	15	64	70	70	70	70	243	250
	1.2.		62	70	70	70	70	244	250
	1.3.		62	70	70	70	70	245	250
	2.1.	30	45	50	54	56	70	231	250
	2.2.		44	54	55	56	70	236	250
	2.3.		43	53	55	56	70	235	250
	3.1.	60	28	44	48	51	70	206	250
	3.2.		27	42	46	49	70	208	250
	3.3.		27	43	48	49	70	208	250
З 2 шарами вогнезахисної фанери	1.4.	15	70	70	70	70	70	250	250
	1.5.		70	70	70	70	70	250	250
	1.6.		70	70	70	70	70	250	250
	2.4.	30	60	65	65	65	70	240	250
	2.5.		62	66	70	70	70	243	250
	2.6.		65	68	70	70	70	245	250
	3.4.	60	36	46	50	55	70	227	250
	3.5.		44	48	51	53	70	215	250
	3.6.		42	47	50	53	70	215	250
Без облицювання вогнезахисною фанерою	1.7.	15	67	68	69	70	70	241	250
	1.8.		69	69	70	70	70	239	250
	1.9.		67	69	69	69	70	238	250
	2.7.	30	43	50	50	49	70	232	250
	2.8.		42	42	48	51	70	236	250
	2.9.		44	44	48	48	70	237	250
	3.7.	60	29	31	34	37	70	198	250
	3.8.		19	26	31	33	70	176	250
	3.9.		21	33	37	38	70	213	250

Загальний вигляд зразків-фрагментів дерев'яних балок, облицьованих вогнезахисною фанерою, після проведення вогневих експериментів за різний час випробування, з метою візуального порівняння та створення експериментальної бази їх поведінки в умовах стандартного температурного режиму пожежі висвітлено на рис. 3.6.

Без вогнезахисного облицювання



З вогнезахисним облицюванням 10



З вогнезахисним облицюванням 20

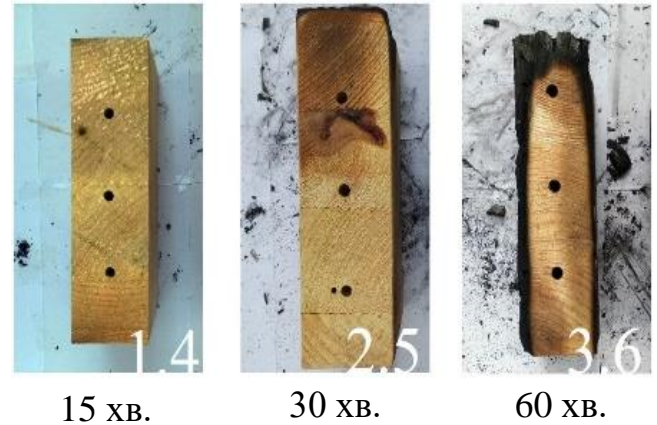


Рис. 3.6. Фото зразків після проведення вогневих випробувань.

Застосовуючи дані вимірювання, були визначені границі обвуглювання зразків-фрагментів дерев'яних балок із їх апроксимацією за допомогою ліній кривих Без'є третього порядку, відповідно до часу експонування. У загальному вигляді рівняння кривої Без'є n -го порядку в багатовимірному просторі для кожної координати має такий вигляд:

$$r(t) = \sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} \times a_i t^i (1-t)^{n-i}, \quad (3.7)$$

При конструюванні криволінійних ободів дискретна інформація може задаватися як безліччю характерних точок, так і безліччю ліній. У цих випадках при формуванні математичних моделей безперервних ободів вирішують такі завдання [151,152,153]:

1. Наближене представлення функції, якщо задана функція складна (з погляду обчислення її значень), то потрібно замінити її деякою близькою функцією.

2. Наближене відновлення функції з геометричної точки зору завдання інтерполяції (наближеного відновлення) пов'язані з пошуком гладких кривих або поверхонь, що проходять через безліч заданих точок чи ліній.

3. Завдання згладжування функції, тобто недостатньо гладку функцію (що не диференціюється або диференціюється невелике число разів) приблизно представити гладкою функцією. Завдання згладжування виникають, коли необхідно, щоб шукана крива або поверхня описувалася функцією, що забезпечує необхідний ступінь диференціювання.

З погляду математичних розрахунків поділ на дані завдання здійснюється умовно. Один і той же метод може давати не тільки рішення одного із вказаних завдань, але навіть всіх трьох. Для геометричного моделювання найбільше уваги приділяють методам наближення поліномами і раціональними функціями, які забезпечують необхідну точність завдання проєктованих об'єктів [153].

Дані криві Без'є показують лінії зони обвуглювання, які обмежують зону дерева, яка ще необвуглена. Тобто та частина дерев'яної балки, що має несучу здатність і несе супротив діючим навантаженням. Для визначення межі міцності балки потрібно розрахувати граничні зусилля, які визначаються за допомогою границі міцності матеріалу і геометричних характеристик перерізу, що сприймають ці навантаження. Переріз обмежений поліномом – кривою Без'є, що описує детально по точках з достатньою точністю зони обвуглювання.

Графіки залежностей показано на рис. 3.7[154].

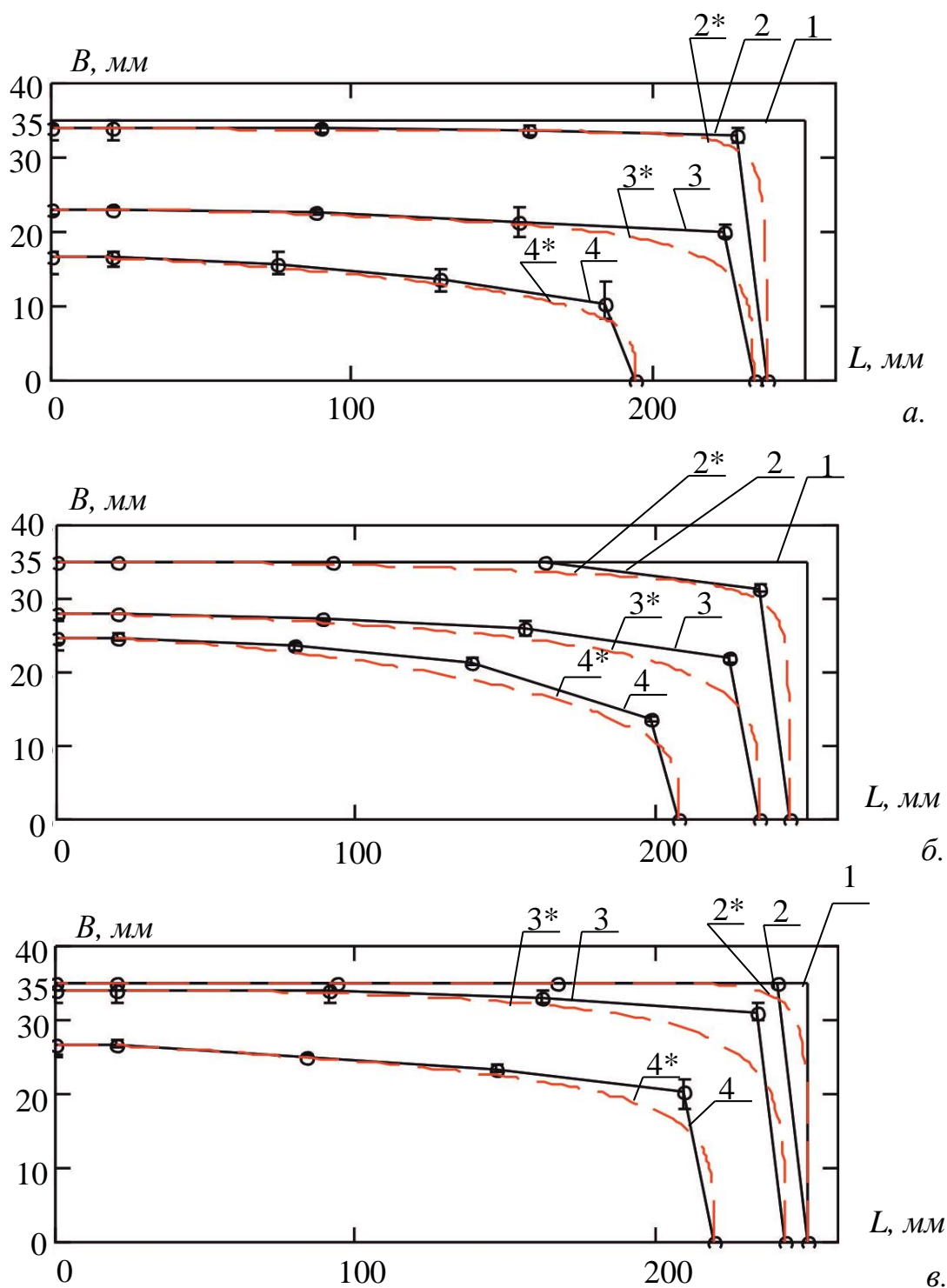


Рис. 3.7 – Лінії границі зони обуглювання із їх апроксимацією за допомогою кривих Без'є: а) без вогнезахисту; б) з шаром вогнезахисного облицювання 10 мм; в) з шаром вогнезахисного облицювання 20 мм; 1 – розмір випробувального зразка до випробування; 2 – зона обуглення для 15 хв випробувань; 2*– крива Без'є для 15 хв випробувань; 3 – зона обуглювання для 30 хв випробувань; 3*– крива Без'є для 30 хв випробувань; 4 – зона обуглювання для 60 хв випробувань; 4*– крива Без'є для 60 хв випробувань.

Отримані [149,154] залежності швидкості обвуглювання від часу експонування були апроксимовані поліноміальними регресійними залежностями типу:

$$\beta(t) = a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3, \quad (3.12)$$

де a_4, a_3, a_2, a_1 – коефіцієнти регресії.

Таким чином, за допомогою розрахункових методів оцінки вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, нами були визначені температурні розподіли у перерізі зразка-фрагмента дерев'яної балки, який піддавався вогневим випробуванням відповідно до рекомендацій [89].

Дані, отримані в результаті проведення вогневих випробувань, були апроксимовані у вигляді поліномів. Регресійні залежності та їх параметри висвітлено в табл. 3.3 та табл. 3.4. [155]

Таблиця 3.3 – Параметри регресійних залежностей глибини бокового обвуглювання від часу проведення вогневого випробування

Коефіцієнти регресії $d(t) = b_1 + b_2t + b_3t^2 + b_4t^3$	b_1 , мм	b_2 , мм·хв. ⁻¹	b_3 , мм·хв. ⁻²	b_4 , мм·хв. ⁻³
Без облицювання	0.662	0.673	$-6.01 \cdot 10^{-3}$	0
З облицюванням вогнезахисною фанерою 10 мм	0	0,585	-0,013	1,111
З облицюванням вогнезахисною фанерою 20 мм	0.47	0.384	$-3.648 \cdot 10^{-3}$	0

На рис. 3.7 графіки отриманих регресійних залежностей глибини бокового обвуглювання випробувальних зразків з вогнезахисним облицюванням вогнезахисною фанерою дерев'яних балок, а також для фрагментів без вогнезахисного облицювання висвітлені двома кривими: перша отримана

експериментально, відповідно до стандартного температурного режиму, а друга описана за допомогою регресійних залежностей розрахунковим методом.

Таблиця 3.4 – Параметри регресійних залежностей торцевої глибини обвуглювання від часу проведення вогневого випробування

Коефіцієнти регресії $d(t) = b_1 + b_2t + b_3t^2 + b_4t^3$	b_1 , мм	b_2 , мм·хв. ⁻¹	b_3 , мм·хв. ⁻²	b_4 , мм·хв. ⁻³
Без облицювання	1.536	0.353	$9.192 \cdot 10^{-3}$	0
З облицюванням вогнезахисною фанерою 10 мм	0.718	0.336	$1.448 \cdot 10^{-3}$	0
З облицюванням вогнезахисною фанерою 20 мм	0	1.031	-0.022	$1.687 \cdot 10^{-4}$

Залежності бічної та торцевої швидкостей обвуглювання балки від часу експонування, висвітлені на рис.3.8 та рис.3.9. Зазначені залежності були отримані за допомогою диференціювання регресійних залежностей глибини обвуглювання від часу експонування, які висвітлені у табл. 3.3 та табл.3.4.

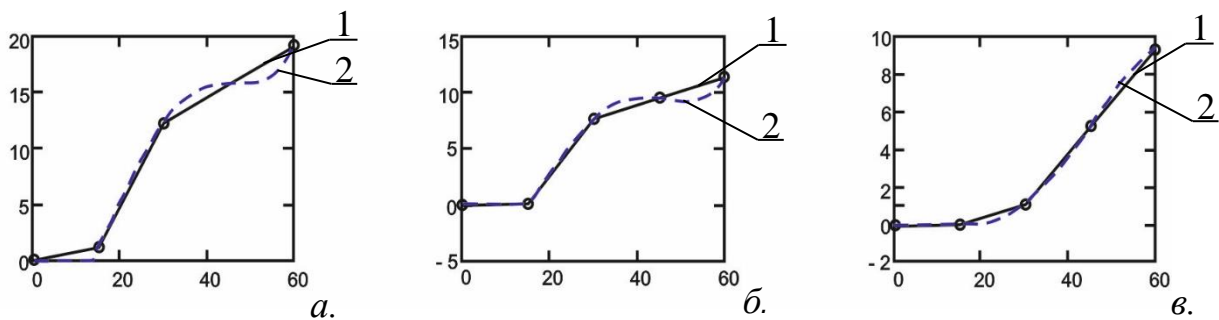


Рис.3.8. Залежності бічної товщини обвугленого шару зразків-фрагментів без вогнезахисту (а), зразків-фрагментів із шаром вогнезахисного облицювання 10 мм (б), зразків-фрагментів із шаром вогнезахисного облицювання 20 мм (в): 1 – експериментальна залежність; 2 – регресійна залежність.

На рис. 3.9 висвітлено графіки регресійних залежностей торцевої глибини обвуглювання фрагментів дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням

вогнезахисною фанерою, а також для фрагментів дерев'яної балки без вогнезахисного облицювання.

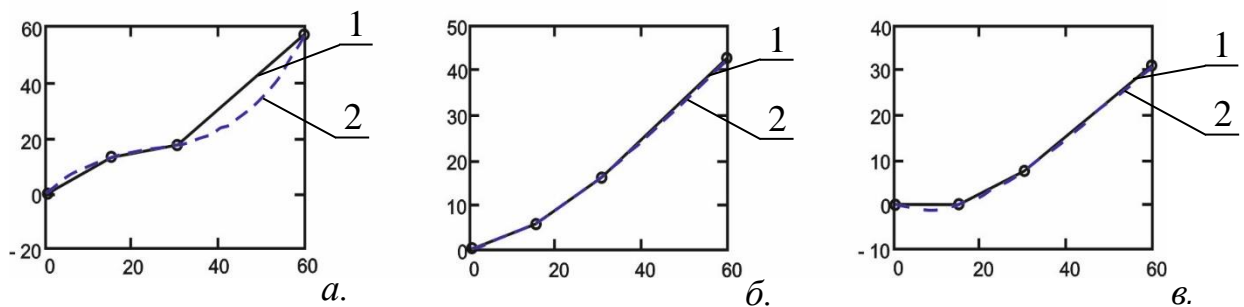


Рис.3.9. Залежності торцевої товщини обвугленого шару зразків-фрагментів без вогнезахисту (а), зразків-фрагментів із шаром вогнезахисного облицювання 10 мм (б), зразків-фрагментів із шаром вогнезахисного облицювання 20 мм (в): 1 – експериментальна залежність; 2 – регресійна залежність

3.4. Висновки до розділу

1. Проведено дослідження закономірностей зміни температури у внутрішніх шарах фрагментів зразків дерев'яних балок облицьованих вогнезахисною фанерою, що залежить від часу випробування в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

2. Виявлено закономірності зміни торцевої та бокової глибини обвуглювання експериментальних зразків у залежності від часу їх експонування за стандартним температурним режимом пожежі.

3. Встановлено відповідні швидкості обвуглювання зразків-фрагментів дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисною фанерою залежно від часу їх експонування в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

4. Встановлено, що закономірності товщини шару вогнезахисного обвуглювання вогнезахисною фанерою дерев'яних балок відрізняється від зони обвуглювання балок без облицювання і на останніх етапах нагріву може бути у два рази меншою.

5. Виявлено закономірні відмінності температурних розподілів у різний часовий інтервал можливого впливу пожежі за стандартним температурним режимом для зразків-фрагментів дерев'яних балок облицьованих вогнезахисною фанерою та без облицювання. Встановлено, що дерев'яні балки облицьовані вогнезахисною фанерою з товщиною шару облицювання 20 мм прогріваються повільніше, що впливає на підвищення вогнестійкості даних конструкцій.

6. Висвітлено отримані результати експерименту та показно, що вони не суперечать теоретичним уявленням щодо процесу нагрівання та обвуглювання захищених дерев'яних балок шляхом облицювання вогнезахисною фанерою та не захищених дерев'яних балок.

7. Визначено і показано дисперсії вимірювань, що підтверджують вірогідність отриманих результатів.

8. Виявлено закономірності показника степені інтерполяційної параболічної функції при визначенні температурних полів у середині дерев'яних балок залежно від часу їх експонування за стандартним температурним режимом пожежі протягом 60 хв.

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ПЕРЕРІЗУ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК

4.1. Математична модель прогнозування геометричної форми перерізу вогнезахисних дерев'яних балок в умовах пожежі

При визначенні за розрахунковим методом торцевої та бічної товщини обвугленої зони перерізу дерев'яних балок, підданих тристоронньому нагріву в умовах пожежі, згідно із результатами, що наведені у роботах [156-159], можна використовувати наступні формули.

При визначенні бічної товщини обвугленої зони перерізу дерев'яних балок:

- без вогнезахисту

$$d_s(t) = \beta_s t;$$

- із вогнезахисним облицюванням $w = 10 \div 20$ мм (4.1)

$$d_s(t) = 0 \text{ при } 0 \leq t \leq t_{0s}$$

$$d_s(t) = \beta_s t \text{ при } t_{0s} < t;$$

При визначенні торцевої товщини обвугленої зони перерізу дерев'яних балок:

- без вогнезахисту

$$d_e(t) = \beta_e t;$$

- із вогнезахисним облицюванням $w = 10 \div 20$ мм (4.2)

$$d_e(t) = 0 \text{ при } 0 \leq t \leq t_{0e}$$

$$d_e(t) = \beta_e t \text{ при } t_{0e} < t;$$

У дані формули входить час t у хвиликах. Товщина обвуглювання у даних формулах визначається за допомогою швидкості бічного обвуглювання β_s та швидкості торцевого обвуглювання β_e , які згідно із роботами [89,158-162] можна прийняти за постійні величини.

Враховуючи результати досліджень, що наведені у роботах [143,150], були визначені усереднені значення швидкостей обвуглювання деревини вогнезахисних дерев'яних балок. За таких умов величини даних швидкостей обвуглювання становлять:

$\beta_s = 0.31$ мм/хв – швидкість бічного обвуглювання, мм/хв;

$\beta_e = 0.96$ мм/хв – швидкість торцевого обвуглювання, мм/хв.

Параметри t_{0s} та t_{0e} – відповідно час затримки процесу обвуглювання на бічній та торцевій стороні перерізу дерев'яної балки. Час затримки процесу обвуглювання на сторонах перерізу балки визначається за узагальненими експериментальними даними, наведеними у попередньому розділі даної роботи.

Одержані дані часу затримки процесу обвуглювання подані у табл. 4.1.

Таблиця 4.1. – Час затримки процесу обвуглювання перерізів дерев'яних балок із вогнезахистом та без нього

Товщина шару вогнезахисної фанери, d , мм	Час затримки обвуглювання на бічній стороні перерізу, t_{0s} , хв	Час затримки обвуглювання на торцевій стороні перерізу, t_{0e} , хв
0	0	0
10	15	11
20	25	20

У роботах [156-159] зроблене припущення, що контурна лінія зони обвуглювання перерізу дерев'яної балки є подібною до ізотерми температурного поля прогрівання даного перерізу під дією стандартного температурного режиму пожежі із критичною температурою $\theta_{кр} = 200$ °С. Відповідно до результатів, наведених у роботах [89,156-159] можна апроксимувати контур зони обвуглювання із застосуванням певної параметричної кривої. Згідно із роботами [156-159], для такої апроксимації зручно використовувати параметричні лінії Без'є. У даному випадку конфігурація ліній Без'є може бути визначена за допомогою 5-ти характерних точок, які зафіксовані на ізотермах із критичною

температурою. Для уникнення основного недоліку такого підходу, який полягає у недостатній точності наближення ізотерм, застосовується підхід, описаний у роботі [158]. Відповідно до даного підходу, положення перших трьох ключових точок фіксується на вершинах прямокутника, в який вписується ізотерма, а дві останні фіксуються між ними на сторонах описаного прямокутника. Схема визначення положення даних ключових точок наведена на рис. 4.1.

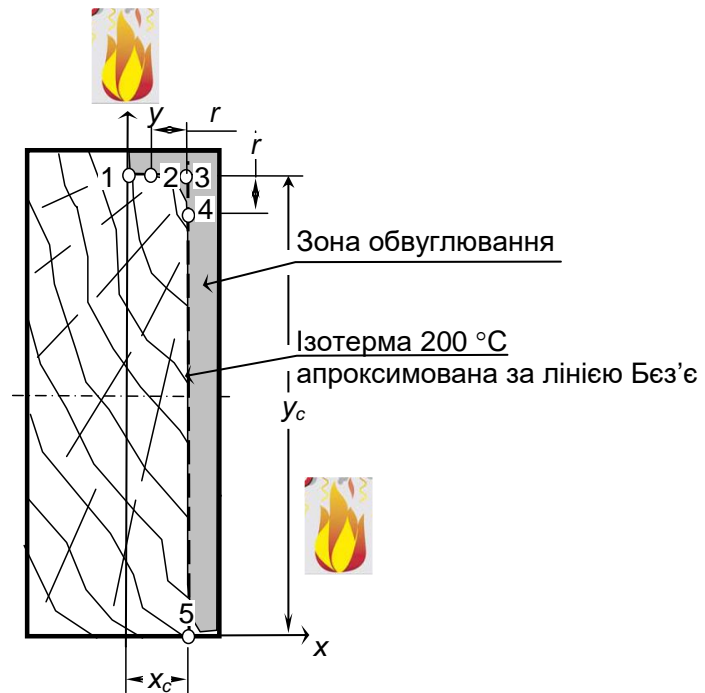


Рис. 4.1. Схема положень ключових точок для встановлення параметричних функцій ліній Без'є, апроксимуючих відповідні ізотерми із критичною температурою ініціації процесу обвуглювання.

Використовуючи координати, визначені описаним вище способом п'яти ключових точок, визначається відповідна параметрична функція лінії Без'є, яка має неявну форму за виразом [164]:

$$\Omega(u) = \sum_{k=1}^n \omega_k B_{k,n}(u), \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (4.3)$$

де $n = 5$ – кількість ключових точок;

$B_{k, n}(u)$ – поліноми Бернстайна для описання параметричних функцій кривих Без'є;

ω_k – вектор відповідних координат ключових точок для описання параметричних функцій кривих Без'є;

Поліноми Берстайна записуються у вигляді формули:

$$B_{p,n}(u) = \frac{n!}{p!(n-p)!} u^p (1-u)^{n-p}, \quad (4.4)$$

де p – степінь полінома Бернстайна;

u – параметр неявних функцій координат.

Матричне рівняння (4.3) за таких умов записується у вигляді алгебраїчної системи з двох параметричних рівнянь:

$$X(u) = \sum_{p=1}^n x_p B_{p,n}(u), \quad Y(u) = \sum_{p=1}^n y_p B_{p,n}(u). \quad (4.5)$$

Вектори координат записуються через такі вирази:

$$\omega_x = \begin{cases} (0 \ x_c - r \ x_c \ x_c \ x_c)^T; & x_c > r \\ (0 \ 0 \ x_c \ x_c \ x_c)^T; & x_c \leq r \end{cases}, \quad \omega_y = (y_c y_c y_c y_c - r_0)^T; \quad 0 \leq r \leq y_c. \quad (4.6)$$

Координати, що є компонентами векторів (4.6), обчислюються згідно із схемою, яка подана на рис. 4.1. Параметризація функцій кривих Без'є базується на припущенні, що параметр r визначається за найбільшим габаритним розміром перерізу балки у безрозмірному відносному представленні у вигляді параметричної функції $r = f(y_c/h)$.

Такий запис потрібний для опису перерізів з іншими габаритними розмірами та різними їх співвідношеннями.

Згідно з роботою [158], описаний прямокутник для побудови ліній Без'є визначається параметрами x_c та y_c , що визначаються як функції із використанням залежностей (4.1) та (4.2). У такому разі дані функції записуються у вигляді:

$$x_c(t, t_{0s}) = \begin{cases} 0.5b - d_s(t, t_{0s}), & b > 2d_s(t, t_{0s}) \\ 0, & b \leq 2d_s(t, t_{0s}) \end{cases}; \quad y_c(t, t_{0e}) = \begin{cases} h - d_e(t, t_{0e}), & h > d_e(t, t_{0e}) \\ 0, & h \leq d_e(t, t_{0e}) \end{cases}, \quad (4.7)$$

де b та h – відповідно ширина та висота перерізу балки.

Параметр r , що визначає умовний радіус округлення лінії контуру зони обвуглювання, визначається як параметрична функція подібно до параметрів описаного прямокутника за виразами (4.7):

$$r(t, t_{0e}) = \begin{cases} \mathbf{Lu}(t, t_{0e}) \cdot \mathbf{a}, & \mathbf{Lu}(t, t_{0e})^T \mathbf{a} > 0 \\ 0, & \mathbf{Lu}(t, t_{0e}) \cdot \mathbf{a} \leq 0 \end{cases}. \quad (4.8)$$

Тут векторні функції визначаються за виразами, які використовують рівняння регресії, що отримані у роботі [158]:

$$\mathbf{Lu}(t, t_{0e}) = \left[1 \quad y_c(t, t_{0e}) \cdot h^{-1} \quad y_c(t, t_{0e})^2 \cdot h^{-2} \quad y_c(t, t_{0e})^3 \cdot h^{-3} \quad y_c(t, t_{0e})^4 \cdot h^{-4} \quad y_c(t, t_{0e})^5 \cdot h^{-5} \quad y_c(t, t_{0e})^6 \cdot h^{-6} \right]^T, \quad (4.9)$$

$$\mathbf{a} = (0.979 \quad 0.064 \quad 3.6 \quad -32.339 \quad 59.242 \quad -41.82 \quad 10.273). \quad (4.10)$$

Використовуючи формули (4.6) – (4.8), алгебраїчна система рівнянь для описання контуру обвугленої зони перерізу вогнезахищених дерев'яних балок набуває вигляду:

$$X_b(u, t, t_{0s}) = \sum_{p=1}^n \omega_x(t, t_{0s}) B_{p,n}(u) ; \quad (4.11)$$

$$\omega_x(t, t_{0s}) = \begin{cases} (0 \quad x_c(t, t_{0s}) - r(t, t_{0e}) \quad x_c(t, t_{0s}) \quad x_c(t, t_{0s}) \quad x_c(t, t_{0s}))^T; & x_c(t, t_{0s}) > r(t, t_{0e}) \\ (0 \quad 0 \quad x_c(t, t_{0s}) \quad x_c(t, t_{0s}) \quad x_c(t, t_{0s}))^T; & x_c(t, t_{0s}) \leq r(t, t_{0e}) \end{cases}$$

$$Y_b(u, t, t_{0e}) = \sum_{p=1}^n \omega_y(t, t_{0e}) B_{p,n}(u) \quad ;$$

$$\omega_y(t, t_{0e}) = \begin{cases} (y_c(t, t_{0e}) & y_c(t, t_{0e}) - r(t, t_{0e}) & y_c(t, t_{0e}) & y_c(t, t_{0e}) & 0)^T; & y_c(t, t_{0e}) > r(t, t_{0e}) \\ (y_c(t, t_{0e}) & y_c(t, t_{0e}) & y_c(t, t_{0e}) & 0 & 0)^T; & y_c(t, t_{0e}) \leq r(t, t_{0e}) \end{cases} \quad (4.12)$$

Використовуючи запропоноване математичне забезпечення, можна прогнозувати конфігурацію обвугленої зони дерев'яних балок із вогнезахистом на основі просоченої фанери. Для відтворення конфігурації обвугленої зони у перерізі дерев'яних балок із вогнезахистом на основі просоченої фанери були розглянуті конкретні конструктивні параметри таких дерев'яних балок. Прийняті параметри подані у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Конструктивні параметри перерізів дерев'яних балок із вогнезахистом на основі просоченої фанери

Ширина перерізу, b , мм	Висота перерізу, h , мм	Ширина шару вогнезахисту, w , мм		
100	200	0	10	20
200	400	0	10	20
300	600	0	10	20

Використовуючи даний математичний апарат, були визначені основні параметри для побудови кривих Без'є, які окреслюють контур обвугленої зони перерізу дерев'яної балки із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього. Для дерев'яних балок, параметри яких наведені у табл. 4.2, на основі отриманих параметрів були побудовані криві Без'є, які окреслюють контур обвугленої зони у перерізі даних балок.

Побудовані криві наведені на рис. 4.2 – рис. 4.4.

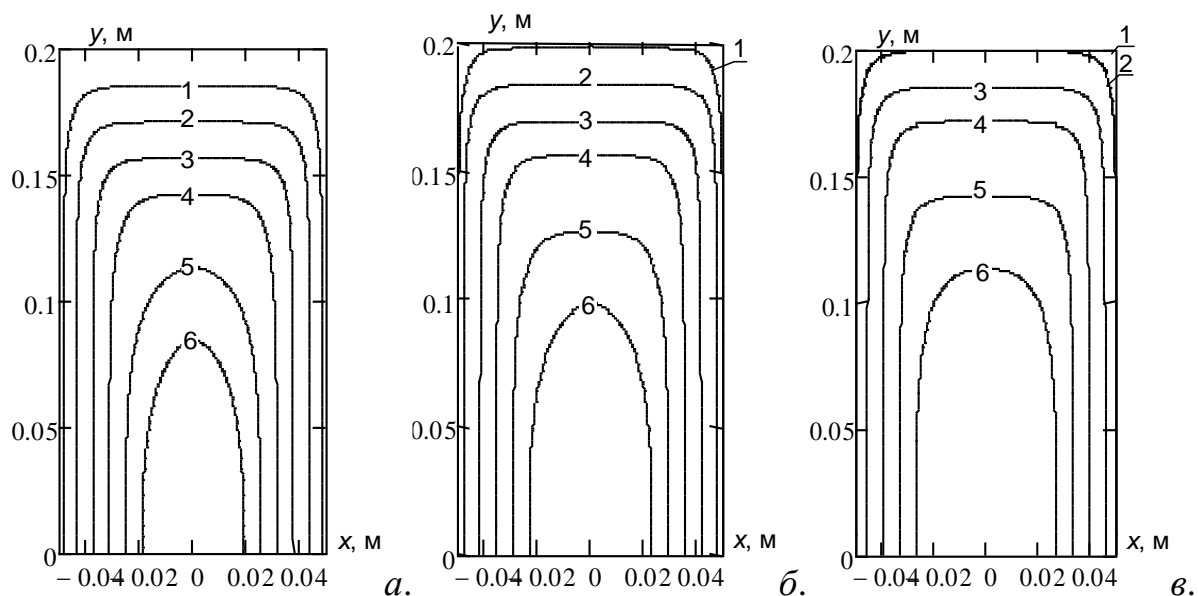


Рис. 4.2. Розташування лінії контуру зони обвуглювання, апроксимованої за допомогою кривої Без'є у перерізі дерев'яної балки 100×200 без вогнезахисту (а), із вогнезахисним облицюванням $w = 10$ мм (б); із вогнезахисним облицюванням $w = 20$ мм (в) у різні моменту часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – 15 хв; 2 – 30 хв; 3 – 45 хв; 4 – 60 хв; 5 – 90 хв; 6 – 120 хв.

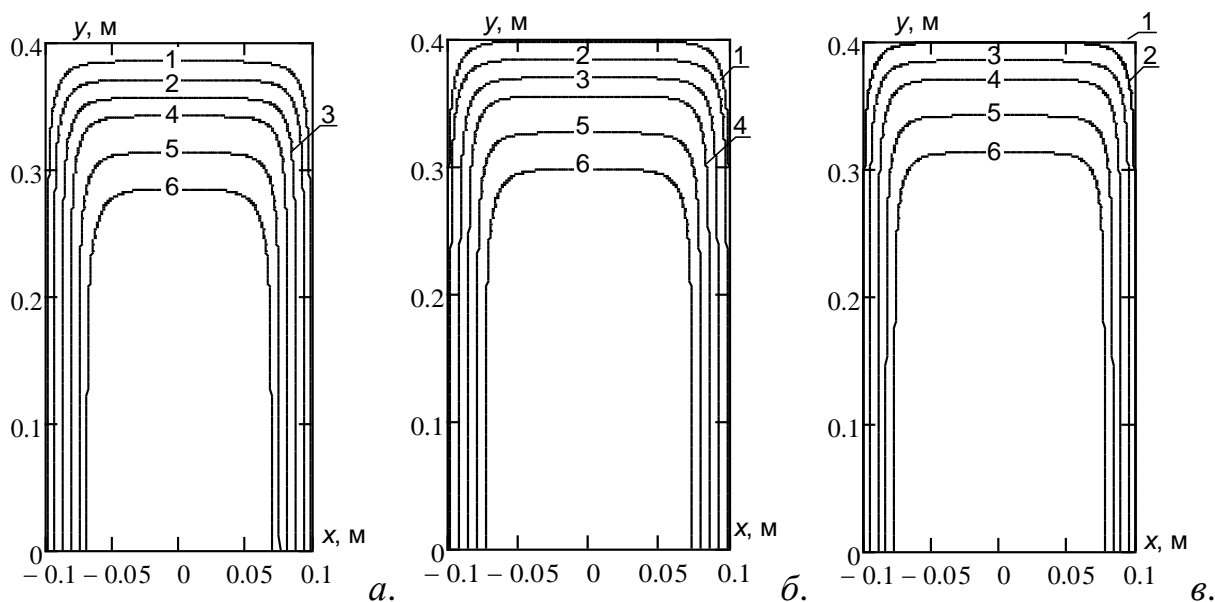


Рис. 4.3. Розташування лінії контуру зони обвуглювання, апроксимованої за допомогою кривої Без'є у перерізі дерев'яної балки 200×400 без вогнезахисту (а), із вогнезахисним облицюванням $w = 10$ мм (б); із вогнезахисним

облицюванням $w = 20$ мм (*в*) у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – 15 хв; 2 – 30 хв; 3 – 45 хв; 4 – 60 хв; 5 – 90 хв; 6 – 120 хв.

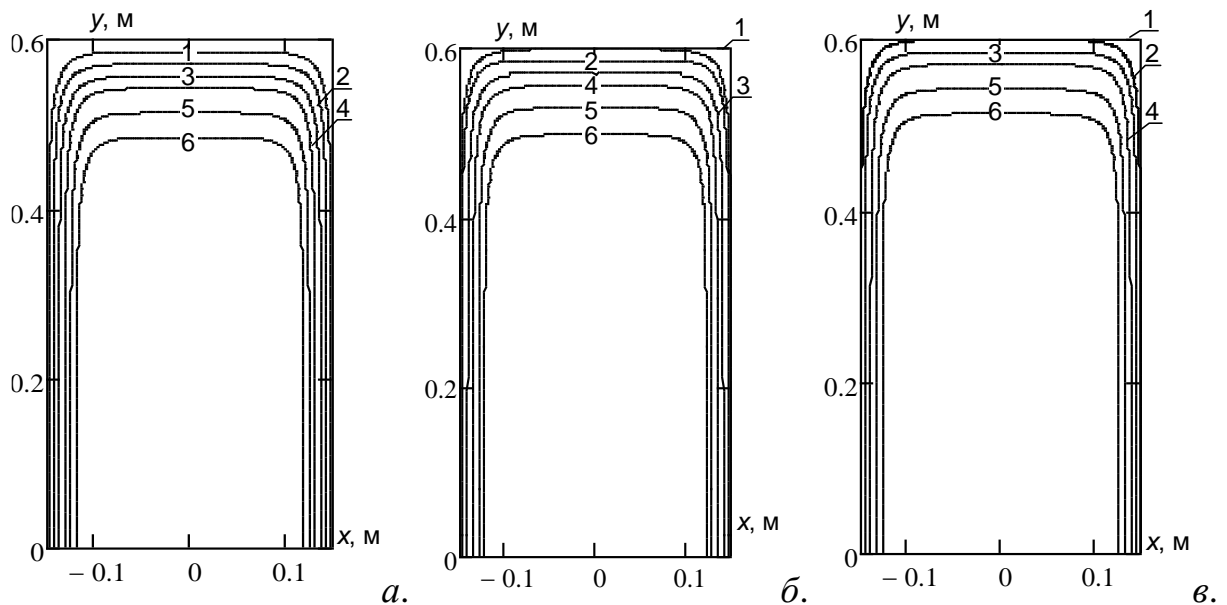


Рис. 4.4. Розташування лінії контуру зони обвуглювання, апроксимованої за допомогою кривої Без'є у перерізі дерев'яної балки 300×600 без вогнезахисту (*а*), із вогнезахисним облицюванням $w = 10$ мм (*б*); із вогнезахисним облицюванням $w = 20$ мм (*в*) у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – 15 хв; 2 – 30 хв; 3 – 45 хв; 4 – 60 хв; 5 – 90 хв; 6 – 120 хв.

З рис. 4.2 – рис. 4.4 видно, що запропонована математична модель для побудування зони обвуглювання у залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі дозволяє ефективно прогнозувати геометричну конфігурацію зони обвуглювання дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього.

Для аналізу точності отриманих даних щодо зони обвуглювання був проведений порівняльний аналіз даних, що отримані експериментальним шляхом з даними, отриманими на основі розрахунку. Для цього були побудовані контури зон обвуглювання для перерізів дерев'яних балок, фрагменти яких були випробувані за методикою, наведеною у попередніх двох розділах.

На рис. 4.5 наведені контури зони обвуглювання перерізів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього. Також на даних графіках наведено контури обвугленої зони, що було отримано експериментально.

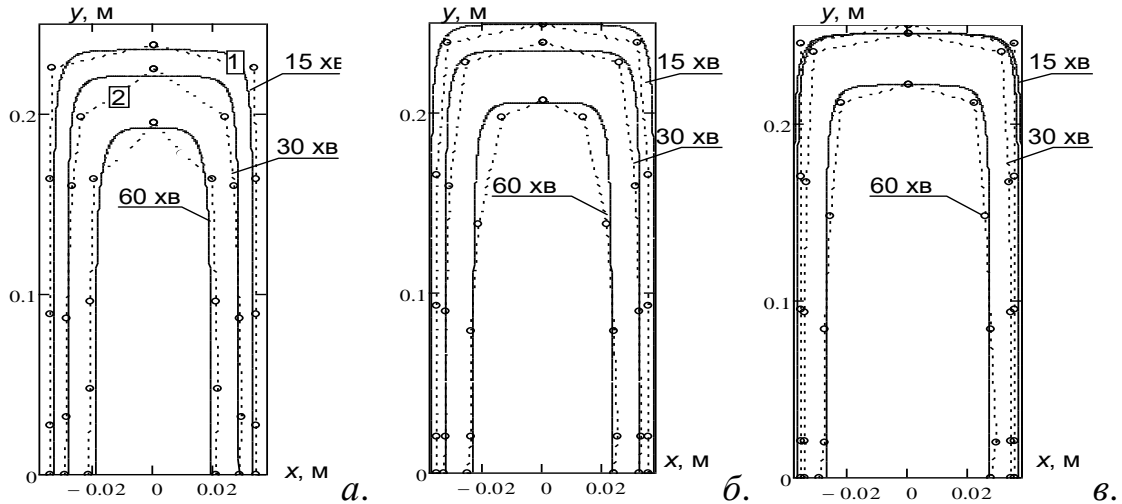


Рис. 4.5. Розташування лінії контуру зони обвуглювання, апроксимованої за допомогою кривої Без'є у перерізі дерев'яної балки 70×250 без вогнезахисту (а), із вогнезахисним облицюванням $w = 10$ мм (б); із вогнезахисним облицюванням $w = 20$ мм (в) у різні моменту часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: 1 – розрахункові дані; 2 – експериментальні дані.

Аналіз графіків, наведених на рис. 4.5, показав, що запропонований метод апроксимації контуру обвугленої зони перерізу дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери є достатньо точним оскільки добре відтворює даний контур. Середня відносна похибка відтворення контуру обвугленої зони дерев'яної балки 70×250 із вогнезахистом та без нього складає не більше 6.4 %, що підтверджує вищезазначене. Це також означає, що можна припустити достатню точність при відтворенні зони обвуглювання при його застосуванні для балок із іншими перерізами.

Для того, щоб проаналізувати величину імовірної похибки при моделюванні обвугленої зони перерізу дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього, за запропонованим нами методом був використаний метод збурень. Метод збурень базується на

модифікації вихідних даних на певну величину, яка називається збуренням і дорівнює величині імовірної похибки. За даними «збуреними» обчислюються інші відповідні параметри. Результати проведених розрахунків за даними параметрами із «збуренням» порівнюються із результатами, отриманими за початковими даними без «збурення». Такий порівняльний аналіз дозволяє оцінити достовірність методу з огляду на чутливість його похибки до експериментальної похибки проведених дослідів.

Для проведення аналізу за методом збурень початковими даними із наданими збуреннями є величини геометричних вимірів зони обвуглювання перерізів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього. Похибки, що були визначені під час вимірювань, подані на рис. 3.7.

Після надання збурень були побудовані нові криві Без'є, які окреслюють зони обвуглювання в залежності від часу випробування за умов стандартного температурного режиму для досліджуваних балок і на основі них за алгоритмом, наведеним у даній роботі, визначені відхилення, що подані у табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Величини похибки методу прогнозування вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери

Тип дерев'яної балки	Абсолютне відхилення, мм	Відносне відхилення, %	Середнє відносне відхилення, %
Без просочення	8	11.4	9.533
Облицювання в 1 шар	6	8.6	
Облицювання в 2 шари	6	8.6	

Дані табл. 4.3 засвідчують, що точність запропонованого методу прогнозування обвугленої зони у перерізах дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери є достатньою, адже найбільше відносне відхилення результатів, одержаних за допомогою даного методу, дорівнює не більше ніж 11,4 %.

4.2. Математична модель для визначення несучої здатності вогнезахищених дерев'яних балок в умовах пожежі

Для прогнозування несучої здатності дерев'яних балок із прямокутним перерізом з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери та без нього нами запропоновано використати інженерний розрахунковий підхід, що міститься у рекомендаціях EN 1995-1-2: 2012 Eurocode 5 [89]. Вказаний підхід полягає у обчисленні несучої здатності досліджуваних дерев'яних балок за виразами, які встановлюють її за напруженнями згину у перерізі за формулою:

$$f_{c,d,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{c,0,k} , \quad (4.13)$$

де $f_{c,0,k} = 50$ МПа – міцність деревини на стискання при згині балок за нормальних умов, виготовлених з сосни конструкційної [89];

$k_{mod,fi} = \frac{W_{ef}}{W_r}$ – коефіцієнт зниження міцності дерев'яної балки із прямокутним перерізом при згині [89].

де W_{ef} – приведений осьовий момент опору перерізу балки при згині, визначений за поточною конфігурацією обвугленої зони;

W_r – осьовий момент опору перерізу балки при згині за умов відсутності теплового впливу пожежі.

Осьовий момент опору перерізу балки із прямокутним перерізом при згині за відсутності теплового впливу пожежі визначається з відомого співвідношення:

$$W_r = \frac{bh^2}{6} . \quad (4.14)$$

При визначенні приведенного моменту опору перерізу при згині для балок, що досліджуються за параметрами геометричної конфігурації обвугленої зони перерізу була використана методика, що ґрунтується на послідовності процедур, що описана вище, при описанні ліній ізотерм із критичною температурою 250 °С з

використанням кривих Без'є. Послідовність процедур включає подані нижче обчислювальні операції.

1. За параметром товщини вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери для певної досліджуваної дерев'яної балки із прямокутним перерізом, а також за часом експонування пожежі із стандартним температурним режимом, відповідним заданому класові вогнестійкості, обчислюється торцева та бічна товщина обвугленої зони перерізу балки з використанням формул (4.1) та (4.2).

2. За параметрами прямокутного перерізу дерев'яної балки, а саме висоти і ширини, обчислюється параметр r/y_c за формулою (4.8).

3. За формулами (4.9) – (4.12) формується функція, за якою будується відповідна крива Без'є для обмеження контуру обвугленої зони в перерізі досліджуваної дерев'яної балки.

4. Сформувавши вираз для функції кривої Без'є, визначається відповідний осьовий момент опору перерізу при згині дерев'яної балки за поточними параметрами геометричної конфігурації обвугленої зони. При цьому застосовується формула [165]:

$$W_{ef} = J_{xc} / (y_0 - y_c), \quad (4.15)$$

де J_{xc} – осьовий центральний момент інерції, який обчислюється за виразом:

$$J_{xc} = \frac{1}{3} \int_0^1 y(u)^3 \frac{dx(u)}{du} du - y_c^2 \int_0^1 y(u) \frac{dx(u)}{du} du, \quad (4.16)$$

тут y_c – ордината положення центру тяжіння геометричної фігури, окресленої відповідним контуром, апроксимованим кривою Без'є. Вказана ордината визначається за формулою, відомою з робіт [158]:

$$y_c = \frac{\int_0^1 y(u)^2 \frac{dx(u)}{du} du}{\int_0^1 y(u) \frac{dx(u)}{du} du}, \quad (4.17)$$

Перші похідні за параметром u від функцій ліній Без'є, що описують контур обвугленої зони, визначаються з використанням формул [164]:

$$\frac{dx(u)}{du} = \sum_{k=1}^n x_k B'_{k,n}(u), \quad \frac{dy(u)}{du} = \sum_{k=1}^n y_k B'_{k,n}(u). \quad (4.18)$$

Перші похідні за параметром u , змінним в інтервалі від 0 до 1, від функцій, які виражають поліноми Бернштейна, визначаються за виразом [164]:

$$B'_{p,n}(u) = B_{p,n}(u) \frac{p-nu}{u(1-u)}. \quad (4.19)$$

При здійсненні операції інтегрування за виразами (4.16) – (4.19) для обчислення осьового моменту опору перерізу балки при згині має враховуватись невизначеність величин похідних, які мають обчислюватись за виразом (4.18), у разі, якщо величина параметру u , для обчислення координат за параметричною формою функцій ліній Без'є, дорівнює значенням $u = 0$ і $u = 1$. Для отримання дійсних величин при проведенні інтегрування вказані значення параметру u мають бути видалені з діапазону інтегрування, а заміщені на ближчі до них числа у межах прийнятної похибки (наприклад, при похибці 0,001 мають бути прийняті: початкове значення інтервалу інтегрування $u = 0,001$ та кінця інтервалу інтегрування $u = 0,999$).

Обчислення визначених інтегралів у виразах (4.16) та (4.17) відбувається з використанням одного з числових методів. У даному випадку був застосований метод трапецій у модифікації Ромберга [166].

Показник несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери для заданого класу

вогнестійкості і відповідного часу експонування за стандартним температурним режимом пожежі обчислюється шляхом перевірки виконання умови втрати несучої здатності балки у моменти часу, визначені за прийнятим часовим кроком. Часовий крок за рекомендаціями [160-163] прийнятий за 1 хв. Умова настання стану втрати несучої здатності записується у вигляді нерівності [89]:

$$f_{c,d,fi} \geq \mu_{fi} f_{c,0,k}, \quad (4.20)$$

де μ_{fi} – коефіцієнт рівня навантаження, що записується у вигляді відношення найбільших напружень, зумовлених прикладеними діючими зусиллями, до напружень, що визначають несучу здатність досліджуваних балок за нормальних умов.

Для вивчення особливостей використання запропонованої удосконаленої методики оцінки несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери були проведені обчислення для балок, що були розглянуті вище. Таким чином, були досліджені балки, геометричні параметри перерізів яких подані у табл. 4.2.

На рис. 4.2 – рис. 4.4 показані контури обвугленої зони перерізів досліджуваних балок без вогнезахисного облицювання та з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери товщиною $d = 10$ мм, 20 мм при впливі пожежі із стандартним температурним режимом різної тривалості, що відповідає стандартному ряду класів вогнестійкості згідно із [89,160-162].

Застосовуючи математичне забезпечення запропонованої удосконаленої методики оцінки несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі, що засноване на використанні формул (4.14) – (4.20), була обчислена несуча здатність даних дерев'яних балок прямокутного перерізу без вогнезахисного облицювання та з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери для різних моментів часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. За отриманими даними, було проведено оцінки їхньої вогнестійкості для діючого

навантаження з коефіцієнтом його рівня $\mu_{fi} = 0.5$. Результати обчислень подані на рис. 4.6.

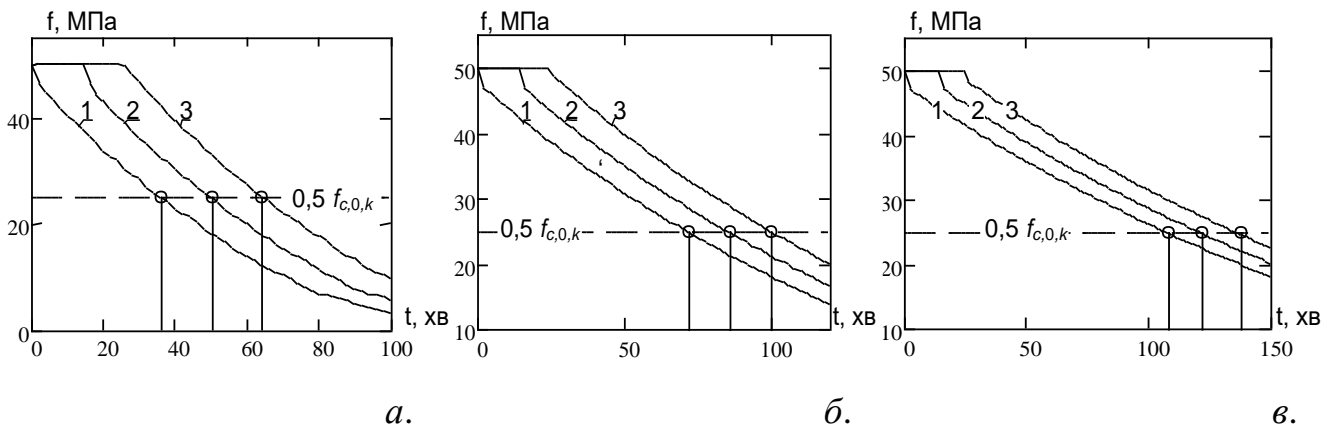


Рис. 4.6. Несуча здатність дерев'яної балки прямокутного перерізу 100×200 мм (а), дерев'яної балки прямокутного перерізу 200×400 мм (б), дерев'яної балки прямокутного перерізу 300×600 мм (в) із різною товщиною вогнезахисного облицювання вогнезахисною фанерою: 1 – 0 мм; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм.

Межа вогнестійкості дерев'яних балок 100×200 мм, 200×400 мм та 300×600 мм без вогнезахисту відповідно склала 36 хв, 72 хв та 108 хв, із вогнезахистом просоченою фанерою завтовшки 10 мм відповідно склала 50 хв, 86 хв та 122 хв, а з вогнезахистом завтовшки 20 мм межа вогнестійкості відповідно склала 64 хв, 100 хв та 138 хв.

Такий результат показує, що застосування одного шару вогнезахисного облицювання просоченою фанерою дозволяє підвищити клас вогнестійкості балки відповідно на один щабель вищого ступеня вогнестійкості.

Даний математичний апарат був використаний для встановлення відповідності досліджуваних дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням та без нього різним класам вогнестійкості у залежності від їх рівня навантаження.

Отримані результати зведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Класи вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням та без нього залежно від їх параметрів

Переріз балки, мм	Коефіцієнт перерізу, $A_b/V, \text{м}^{-1}$	Товщина облицювання, $d, \text{мм}$	Рівень навантаження μ_{fi}	Межа вогнестійкості $U_{fi}, \text{хв}$	Клас вогнестійкості
100×200	25	0	0.3	18	R 15
			0.5	36	R 30
			0.7	59	R 45
		10	0.3	32	R 30
			0.5	50	R 45
			0.7	72	R 60
		20	0.3	42	R 30
			0.5	64	R 60
			0.7	86	R 60
200×400	12.5	0	0.3	36	R 30
			0.5	74	R 60
			0.7	116	R 90
		10	0.3	52	R 45
			0.5	88	R 60
			0.7	132	R 120
		20	0.3	64	R 60
			0.5	104	R 90
			0.7	144	R 120
300×600	8.33	0	0.3	54	R 45
			0.5	108	R 90
			0.7	172	R 150
		10	0.3	68	R 60
			0.5	119	R 90
			0.7	184	R 180
		20	0.3	86	R 60
			0.5	138	R 120
			0.7	204	R 180

Дані табл. 4.4 показують, що найбільш значущими параметрами, що впливають на вогнестійкість дерев'яних балок прямокутного перерізу із

вогнезахисним облицюванням та без нього, є площа обігрівної поверхні, об'єм балки, рівень діючого навантаження та товщина шару вогнезахисного облицювання.

Для вивчення закономірностей залежності межі вогнестійкості від товщини шару вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери були здійснені необхідні обчислення із застосуванням запропонованої удосконаленої методики.

На рис. 4.7 подані розраховані залежності межі вогнестійкості від товщини шару вогнезахисного облицювання для трьох типів перерізів балок, що досліджуються.

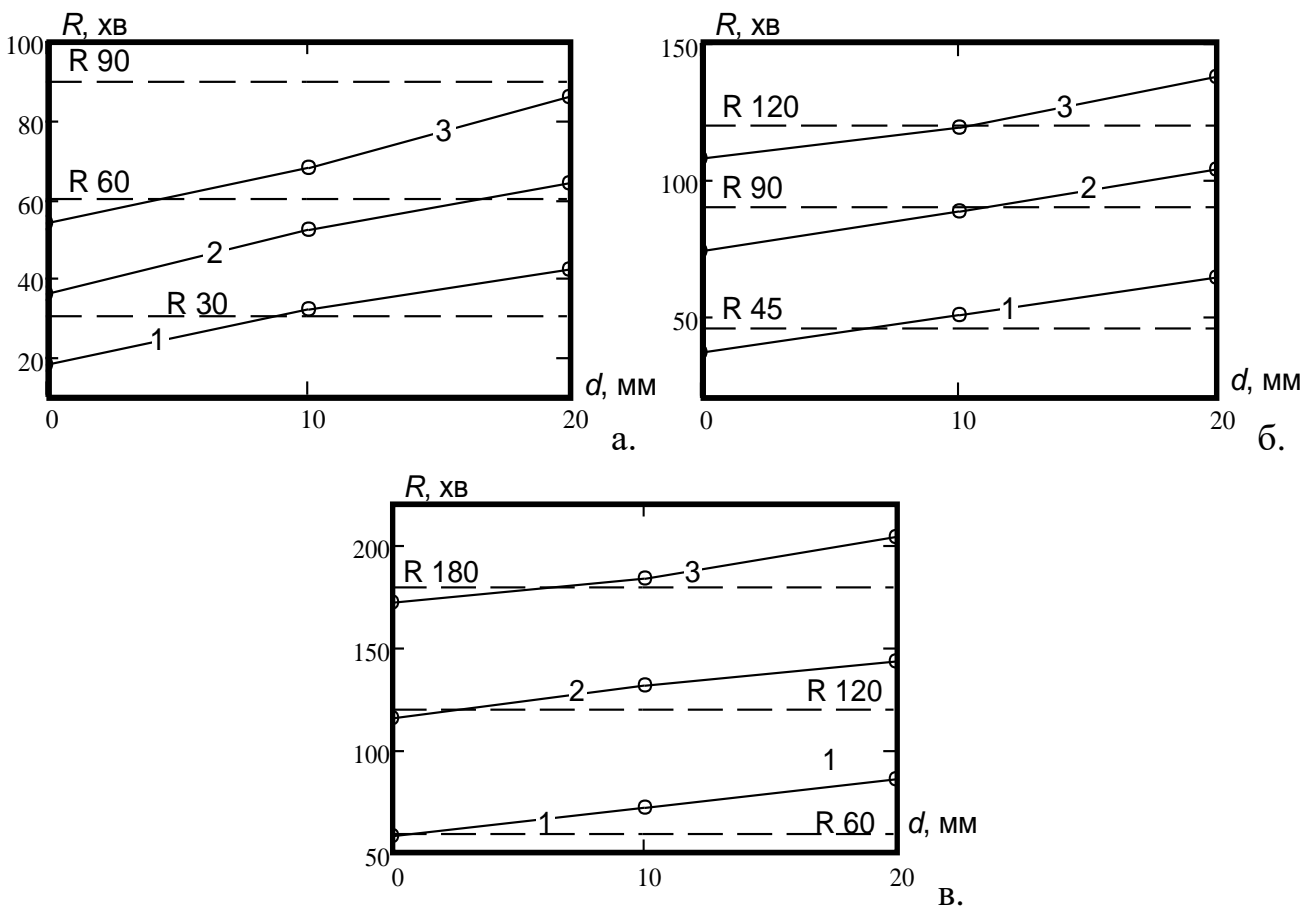


Рис. 4.7. Графік залежності межі вогнестійкості дерев'яних балок з рівнем навантаження $\mu_{fi} = 0.3$ (а), дерев'яних балок з рівнем навантаження $\mu_{fi} = 0.5$ (б), дерев'яних балок з рівнем навантаження $\mu_{fi} = 0.7$ (в) від товщини вогнезахисного облицювання: 1 – прямокутним перерізом 100×200 мм; 2 – прямокутним перерізом 200×400 мм; 3 – прямокутним перерізом 300×600 мм.

Графіки, наведені на рис. 4.7 дають підставу стверджувати, що межа вогнестійкості дерев'яних балок має залежність від товщини вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери, яка є близькою до лінійної залежності.

Також дані графіки чітко показують наявність тенденції до зростання класу вогнестійкості при застосуванні вогнезахисних систем такого типу.

Наведені результати досліджень дозволяють взяти за основу гіпотезу, що межа вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням має лінійну залежність від найбільш значущих параметрів.

Найбільш значущими параметри у даному випадку є: коефіцієнт перерізу A_b/V (мм^{-1}), товщина вогнезахисного облицювання d (мм), а також коефіцієнт рівня навантаження μ_{fi} .

Враховуючи прийняту гіпотезу лінійної залежності, її математична модель може бути побудована на основі регресії [167,168]:

$$U_{fi} = p_0 + p_1x_1 + p_2x_2 + p_3x_3 + p_4x_1x_2 + p_5x_1x_3 + p_6x_2x_3 + p_7x_1x_2x_3, \quad (4.21)$$

де $p_0 - p_7$ – коефіцієнти регресії.

Обчислення коефіцієнтів регресії (4.21) проводиться на основі 8 числових експериментів. Числові експерименти проводяться за простим ортогональним планом, що відповідає матриці плану, поданої нижче у вигляді табл. 4.5 [167,168].

Таблиця 4.5 – Матриця плану повного факторного числового експерименту

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

В табл. 4.6 подані прийняті границі діапазонів, у яких змінюються означені фактори при проведенні числового повного факторного експерименту для побудування математичної моделі залежності межі вогнестійкості.

Таблиця 4.6 – Інтервали варіювання факторів у чисельному експерименті

Коефіцієнт перерізу A_p/V , мм ⁻¹			Товщина просоченої фанери, d , мм			Коефіцієнт навантаження, μ_{fi}		
Найменше значення, A_p/V_{-1}	Середнє значення, A_p/V_0	Найбільше значення, A_p/V_1	Найменше значення, d_{-1}	Середнє значення, d_0	Найбільше значення, d_1	Найменше значення, μ_{-1}	Середнє значення, μ_0	Найбільше значення, μ_1
0.008	0.019	0.03	0	10	20	0,3	0,5	0,7

На основі діапазонів варіювання факторів, які подані у табл. 4.6, з використанням матриці плану повно-факторного експерименту за табл. 4.5, були виконані відповідні обчислення і отримані значення межі вогнестійкості досліджуваних дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери за граничним станом втрати несучої здатності.

Результати обчислень наведені у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу, захищених шляхом облицювання вогнезахисною фанерою за результатами повно-факторного експерименту

Експериментальні ситуації	1	2	3	4	5	6	7	8
Межа вогнестійкості для дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням, U_{fi} , хв	44	86	18	60	80	206	52	181

На основі числових величин табл. 4.7, були обчислені коефіцієнти регресії (4.21) при застосуванні виразів для їх визначення, що подані нижче [167,168]:

$$\begin{aligned}
 p_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{fi} ; & p_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 U_{fi} ; & p_2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 U_{fi} ; \\
 p_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 U_{fi} ; & p_4 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 U_{fi} ; \\
 p_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 U_{fi} ; & p_6 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 U_{fi} ; & p_7 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 U_{fi} ,
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

де $N = 8$ – кількість проведених чисельних експериментів відповідно до плану;

x_i – значення фактору відповідно до матриці плану (див. табл. 4.5);

U_{fi} – значення межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери відповідно до табл. 4.7.

Результати обчислень з визначення коефіцієнтів регресії подані нижче у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Коефіцієнти регресії для обчислення вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери

Коефіцієнт	$p_0,$	$p_1,$	$p_2,$	$p_3,$	$p_4,$	$p_5,$	$p_6,$	p_7
Значення (кодовані)	90.875	-42.375	13.125	-38.875	0.375	21.375	-0.125	-0.375
Значення (реальні)	286.99	-5914.7	-2.57	-196.99	206.25	170.45	0.261	-17.045

4.3. Висновки до розділу

З використанням результатів проведених досліджень була проаналізована задача щодо виявлення закономірностей зміни конфігурації обвугленої зони перерізів дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери. Отримані результати можуть слугувати основами для розрахункового методу прогнозування вогнестійкості дерев'яних балок такого типу.

У ході досліджень було одержано такі основні результати:

1. Запропонована методика розрахунку швидкості обвуглювання перерізів дерев'яних балок без вогнезахисту та з вогнезахисним облицюванням на основі

просоченої фанери завтовшки $d = 0 \div 20$ мм за умов визначення впливу стандартного температурного режиму пожежі, та в результаті доведено, що вогнезахисне облицювання має помітний вогнезахисний ефект, оскільки час затримки початку обвуглювання на торці перерізу складає від 11 хв до 20 хв, а на бічній стороні перерізу – від 15 хв до 25 хв, що використовується як частина початкових даних для реалізації розробленого методу оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок.

2. Доведено, що контури обвугленої зони у перерізах дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери можуть бути наближені лініями Без'є і на основі цього розроблена розрахункова методика прогнозування геометричної конфігурації обвугленої зони.

3. Розроблена методика розрахунку несучої здатності дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери з використанням апроксимації лінії контуру обвугленої зони на основі ліній Без'є;.

4. Встановлена закономірність залежності вогнестійкості від найбільш значущих параметрів: відношення площі обігрівної поверхні балки до її об'єму (A_b/V), товщини облицювання (d), коефіцієнту навантаження (μ_{fi}) у вигляді:

$$U_{fi} = 286.99 - 5914.7 \cdot A_b/V - 2.57d - 196.99\mu_{fi} + 206.25 \cdot A_b/Vd + 170.45 \cdot A_b/V\mu_{fi} + 0.261d\mu_{fi} - 17.045 \cdot A_b/Vd\mu_{fi}.$$

РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК ІЗ ВОГНЕЗАХИСНИМ ОБЛИЦЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ПРОСОЧЕНОЇ ФАНЕРИ

5.1. Метод прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі

Враховуючи результати, отримані у попередньому розділі, можна запропонувати послідовність процедур для розрахункового методу прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі із стандартним температурним режимом, який ґрунтується на спрощених алгоритмах. Одним із таких алгоритмів є використання спеціальних номограм. Вказані номограми можуть бути побудовані на основі отриманої регресії (4.21) для визначення часу настання граничного стану втрати несучої здатності дерев'яними балками прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери. Коефіцієнти отриманої регресії наведені у табл. 4.8. На рис. 5.1 у якості прикладу наведені подібні номограми, побудовані для трьох стандартних класів вогнестійкості.

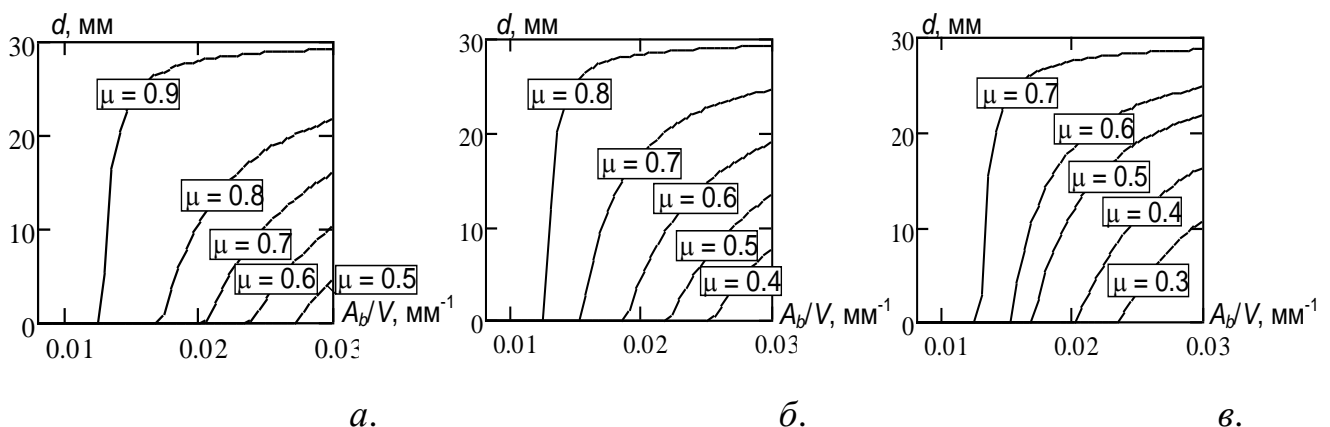


Рис. 5.1. Залежності товщини захисного шару просоченої фанери від коефіцієнту перерізу дерев'яних балок з облицюванням вогнезахисною фанерою при забезпеченні межі вогнестійкості: а – R 30; б – R 60; в – R 90.

Інший підхід дозволяє прогнозувати несучу здатність за допомогою використання спеціальних таблиць. Застосувавши регресію (4.21) із коефіцієнтами, що наведені у табл. 4.8, були отримані відповідні значення товщини вогнезахисту для різних типів вогнезахищених балок для стандартних класів вогнестійкості. За отриманими даними, як приклад, була сформована відповідна таблиця, яка подана нижче.

Таблиця 5.1 – Дані щодо товщини вогнезахисного покриття на основі просоченої фанери для дерев'яних балок прямокутного перерізу при забезпеченні стандартних класів вогнестійкості

Коефіцієнт перерізу, $A_b \setminus V, \text{мм}^{-1}$	Товщина вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери, d, мм			
	R 30	R 60	R 90	R 120
Коефіцієнт навантаження $\mu = 0.5$				
0.008	0	0	0	0
0.0091	0	0	0	0
0.01	0	0	0	0
0.011	0	0	0	0
0.012	0	0	0	0
0.014	0	0	0	9.774
0.015	0	0	0	19.448
0.016	0	0	0	22.752
0.017	0	0	0	24.419
0.018	0	0	5.344	25.425
0.019	0	0	9.342	26.097
0.02	0	0	12.204	26.578
0.021	0	0	14.354	26.939
0.022	0	0.766	16.028	27.221
0.023	0	3.627	17.369	27.446
0.025	0	5.969	18.466	27.631
0.026	0	7.923	19.381	27.785
0.027	0	9.576	20.156	27.915
0.028	1.168	10.995	20.821	28.026
0.029	3.051	12.224	21.397	28.123

Таблиця типу табл. 5.1 може бути використана для перевірки відповідності певному класу вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із

вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери. При наявності проміжних величин коефіцієнту перерізу балки можна застосувати лінійну інтерполяцію.

Таким чином, отримані результати дозволяють визначити послідовність процедур для реалізації методу прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі із стандартним температурним режимом. Тож пропонується при застосуванні даного методу використовувати таку послідовність процедур.

1. За початковими даними балки визначаються основні її параметри: коефіцієнт перерізу, товщина вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери та необхідний клас вогнестійкості.

2. За довідниковою таблицею типу табл. 5.1 визначається відповідність досліджуваної балки до заданого класу вогнестійкості. При наявності проміжних значень параметрів, за якими встановлюється відповідність до заданого класу вогнестійкості, можна застосувати лінійну інтерполяцію.

3. У випадку, коли заданий клас вогнестійкості не підтверджується для досліджуваної балки, можна застосувати наступний за ієрархією підхід, заснований на використанні номограм типу, який поданий на рис. 5.1.

4. Якщо за двома першими за ієрархією підходами клас вогнестійкості для досліджуваної балки не підтверджується, можна застосувати більш точний підхід на основі застосування формул (4.3) – (4.20).

5.2. Уточнений метод прогнозування несучої здатності дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах пожежі

За умови, коли спрощені підходи не дозволяють встановити відповідність досліджуваних до заданого класу вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, можна застосувати уточнений метод, заснований на застосуванні загального

теоретичного підходу з використанням диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану із їхньою апроксимацією за методом кінцевих елементів (далі МКЕ).

5.2.1. Математична модель напружено-деформованого стану у дерев'яних вогнезахисних балках в умовах теплового впливу пожежі. Для моделювання напружено-деформованого стану (далі НДС) у дерев'яних балках прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, може бути використаний узагальнений теоретичний підхід, який заснований на таких положеннях.

1. Для математичного описання напружено-деформованого стану у дерев'яних балках прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери використовується система диференціальних рівнянь НДС твердого тіла, що апроксимується з використанням МКЕ.

2. Тепловий вплив пожежі враховується тільки при побудуванні частини балки, що не піддається обвуглюванню за допомогою формул (4.3) – (4.12). Зміна механічних властивостей матеріалу у необвугленій зоні не враховується.

3. Властивості деревини залежать від поточної деформації нелінійно, а також враховуються великі деформації балок, що можуть бути порівняні з їх розмірами.

4. Система диференціальних рівнянь НДС вирішується числовим методом кінцевих елементів з використанням методу Ньютона – Рафсона, шляхом покрокового прикладання наявного механічного навантаження до ознак руйнування досліджуваної балки.

5. Для розрахунку параметрів НДС деревини в умовах пожежі деформативні характеристики описуються повними несиметричними діаграмами деформування деревини із спадною гілкою або без неї.

6. Критерієм повного руйнування досліджуваної балки є:

- виникнення незбіжності процесу обчислення через виникнення геометричної змінюваності системи;

- виникнення граничних пластичних деформацій в кінцевих елементах моделі;
- досягнення критичних величин швидкості наростання глобальних переміщень точок елементів дерев'яної балки.

При математичному описанні НДС у дерев'яних балках, в умовах навантаження із різною формою не обвугленої зони, враховується, що система рівнянь для обчислення НДС є нелінійною. За таких умов розв'язок цієї задачі з врахуванням всіх особливостей деформування деревини (нелінійної поведінки, пластичних деформацій, великих деформацій, місцевої втрати стійкості і т.п.) може бути здійснений тільки при застосуванні обчислювальних методів [169-173].

До найбільш ефективних методів для даного типу задач відноситься МКЕ. Це зумовлюється широкою універсальністю та впорядкованістю числових алгоритмів, що дає змогу їхньої реалізації на ЕОМ. Більше того, використання подібних підходів дозволяє реалізацію математичних моделей ортотропії механічних властивостей деревини, а також ефективних та економічних обчислювальних алгоритмів врахування великих деформацій [169-173]. У такому разі, здійснення апроксимації диференціальних рівнянь НДС за схемами дискретизації розрахункової області можна розглядати, як загальну систему рівнянь рівноваги окремого КЕ у локальній системі координат у реалізації методу переміщень [169-173]:

$$[K_e] \{u\} = \{F_e\}^{nd} + \{F_e\}^{pr} + \{F_e\}^{th}, \quad (5.1)$$

де $[K_e]$ – матриця жорсткості КЕ, яка визначається за формулою:

$$[K_e] = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV; \quad (5.2)$$

$\{F_e\}^{nd}$ – вектор вузлових сил КЕ;

$\{\mathbf{F}_e\}^{pr}$ – вектор розподілених сил, які прикладені до КЕ. Даний вектор обчислюється за виразом:

$$\{\mathbf{F}_e\}^{pr} = \int_S [\mathbf{N}_n]^T \{\mathbf{P}\} dS; \quad (5.3)$$

$\{\mathbf{F}_e\}^{th}$ – вектор температурних силових факторів, прикладених до вузлів КЕ, який обчислюється за виразом:

$$\{\mathbf{F}_e\}^{th} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \{\boldsymbol{\varepsilon}^{th}\} dV; \quad (5.4)$$

$\{\mathbf{u}\}$ – вектор переміщень вузлів КЕ;

$\{\boldsymbol{\varepsilon}^{th}\}$ – вектор температурних деформацій у вузлах КЕ.

У рівняннях (5.2) – (5.4) матриця деформацій \mathbf{B} КЕ обчислюється за формулою $\mathbf{B} = \mathbf{D}[\mathbf{N}]$. Тут $[\mathbf{N}]$ та $[\mathbf{N}_n]$ матриці відповідно інтерполяційних формул в об'ємі та інтерполяційних формул по грані КЕ, де діють розподілені навантаження. Коли параметри, що є членами матриці жорсткості у рівнянні (5.1), відомі, можна розв'язувати це рівняння відносно переміщень вузлів $\{\mathbf{u}\}$, а після цієї операції, на основі матриці інтерполяційних формул, обчислити внутрішні переміщення КЕ. Для обчислення напружень за визначеними переміщеннями КЕ використовується таке рівняння:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E}(\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}_t) + \boldsymbol{\sigma}_0 \quad (5.5)$$

Для розгляду КЕ у повній сукупності при вирішенні структурної задачі у розрахунковій області дерев'яної балки із вогнезахисним облицюванням вогнезахисною фанерою, дискретизованої на окремі КЕ, застосовується рівняння [169-173]:

$$[\mathbf{K}] \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{P}\}; \quad (5.6)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості всієї системи, що складається з матриць жорсткостей всіх КЕ;

$\{q\}$ – вектор обчислюваних переміщень вузлів, що містить суми векторів переміщень вузлів КЕ;

$\{P\}$ – вектор сил КЕ, який формується із сумарних сил, прикладених до КЕ.

Нелінійність властивостей деревини враховується за умов використання матриць пружності у такому вигляді [169-173]:

$$E = \frac{E(\theta)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{pmatrix}, \quad (5.7)$$

де $E(\theta)$ і ν – відповідно модуль пружності, залежний від температури, та коефіцієнт Пуассона.

Враховуючи те, що діаграми деформування деревини є несиметричними для стиску та розтягу, а також несиметричною є величина модуля пружності для стиску та розтягу, для описання поведінки деревини повинні бути використані спеціальні математичні моделі, які описують цю особливість. При цьому можуть використовуватись математичні моделі, які наведені у роботі [174]. Важливою особливістю процесу деформування деревини є те, що при цьому її можна розглядати як комбінацію гнучких волокон, які набагато інтенсивніше опираються розтягу. Тоді як втрата жорсткості при стиску відбувається помітно швидше з причини зминання вказаних волокон деревини, це пояснює асиметричний характер діаграм деформування для розтягу та стиску, які є

різними уже на початкових ділянках. На рис. 5.2 поданий характерний вигляд діаграм деформування деревини.

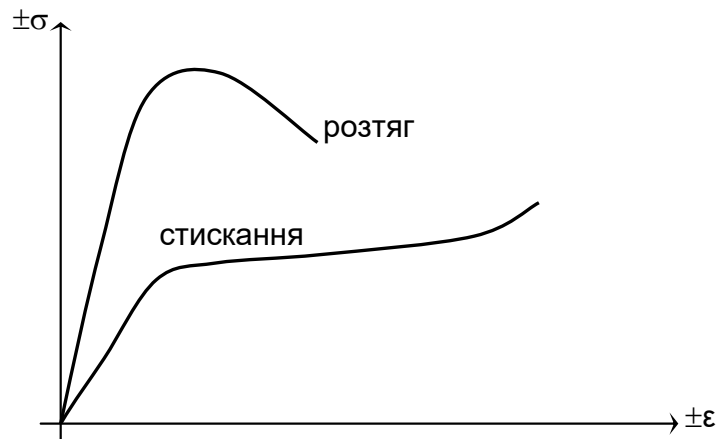


Рис. 5.2. Характерний вигляд асиметричних діаграм деформування деревини.

Для описання фізичної нелінійності стискання та розтягу деревини розв'язується задача обчислення пластичних деформацій і напружень, які відповідають тим деформаціям. Для вирішення задачі застосовується відповідний критерій еквівалентності трьохосового напруженого стану до одноосового, що отримується у результаті багатократних механічних випробувань. У такому разі параметри пластичних деформацій і еквівалентних напружень для НДС даної досліджуваної балки обчислюються з використанням теорії пластичності матеріалу. Для визначення характеристик НДС із урахуванням пластичного деформування деревини за умов застосування МКЕ виконуються розрахункові процедури, подані нижче [169-173].

1. На поточному кроці інтегрування рівнянь за часом обчислюються напруження із виникненням пластичних деформацій у деревині при нормальній температурі згідно з асиметричними діаграмами деформування деревини.

2. Визначаються напруження за значеннями тільки пружних деформацій $\{\epsilon^{tr}\}$, обчислених на попередньому кроці навантаження за рівнянням:

$$\{\sigma^{tr}\} = E \{\epsilon^{tr}\}. \quad (5.8)$$

3. З використанням обчислених значень діючих напружень на даному кроці інтегрування отримуються еквівалентні напруження за однією з рекомендованих математичних моделей текучості. В такому разі використовується багат шарова математична модель Бесселинга [169-173] асоціативної теорії пластичності твердого тіла. За умов застосування такого підходу діаграма деформування деревини ділиться на окремі ділянки прямих з відповідним кутом нахилу. КЕ розбиваються на окремі шари, де НДС ставиться у відповідність даній поточній ділянці діаграми деформування деревини, при цьому вводиться припущення, що їхня деформація є однаковою. Співвідношення параметрів НДС виділених шарів визначається за допомогою вагових коефіцієнтів. Еквівалентні напруження у КЕ визначаються за виразом:

$$\sigma_e = [3/2 \{s\}^T [M] \{s\}]^{1/2}, \quad (5.9)$$

де $\{s\}$ – вектор девіаторних напружень, який обчислюється за виразом:

$$\{s\} = \{\sigma\} - \sigma_m (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad (5.10)$$

де σ_m – гідростатичне напруження, яке отримується з виразу:

$$\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3. \quad (5.11)$$

Тут $[M]$ – матриця, яка набуває вигляду:

$$[M] = \begin{pmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 2 & & \\ & & & & 2 & \\ & & & & & 2 \end{pmatrix}.$$

Якщо еквівалентне напруження перевищує за своїм значенням границю текучості, тоді виконується операція обчислення узгоджувального (пластичного) множника λ з використанням спеціального ітераційного процесу на основі методу Ньютона-Рафсона із застосуванням виразів:

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [\mathbf{M}] \mathbf{E} \{ d\varepsilon \}}{- \left\{ \frac{\partial F}{\partial \chi} \right\} [\sigma]^T [\mathbf{M}] \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [\mathbf{M}] \mathbf{E} \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}}, \quad \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} = \frac{3\{s\}}{2\sigma_e} \quad (5.12)$$

5. Визначається вектор зміни пластичних деформацій за виразом:

$$\varepsilon'^{pl} = \lambda' \frac{\partial Q}{\partial \sigma}, \quad (5.13)$$

де Q – потенціал пластичної течії, який визначається поверхнею, відповідній циліндру фон Мізеса при стисканні, який модифікований з огляду на пластичний коефіцієнт Пуассона при розтягу. Дана поверхня визначається за формулами:

$$Q = \sigma_e - \sigma_c \text{ при } \sigma_m < \sigma_c/3, \quad Q = (\sigma_m - Q)^2/c^2 + \sigma_e^2 = 9Q^2 \text{ при } \sigma_m \geq \sigma_c/3. \quad (5.14)$$

У даному виразі коефіцієнт c обчислюється за виразом:

$$c = \sqrt{\frac{9(1 - 2\nu^{pl})}{5 + 2\nu^{pl}}}. \quad (5.15)$$

6. Обчислюються вектори повних пластичних деформацій, пружних деформацій та відповідних їм напружень за виразами:

$$\{\varepsilon_n^{pl}\} = \{\varepsilon_{n-1}^{pl}\} + \{\Delta\varepsilon^{pl}\}, \{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon^{tr}\} - \{\Delta\varepsilon^{pl}\}, \{\sigma\} = E \{\varepsilon^{el}\}. \quad (5.16)$$

7. Визначається прирощення пластичних деформацій:

$$\Delta\bar{\varepsilon}_c^{pl} = \sigma_t^{-1} \{\sigma\}^T \{\Delta\varepsilon^{pl}\}. \quad (5.17)$$

У даному виразі індекс n визначає номер поточного та попереднього часового кроку.

Для здійснення наведеного алгоритму за прийнятою математичною моделлю зміцнення для ідентифікації діючих сил у тому чи іншому стані використовуються спеціальні функції окремо для розтягу та стискання у вигляді виразів:

$$F_t = 2/3 \sigma_e \cos\theta + \sigma_m - \sigma_t, F_c = \sigma_e - \sigma_c, \quad (5.18)$$

де σ_t , σ_c – напруження на поточному кроці інтегрування при певній пластичній деформації відповідно для розтягу та стиску;

θ – кут нахилу променя поверхні пластичності, що обчислюється за формулою:

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right). \quad (5.19)$$

Тут J_2 та J_3 – другий та третій інваріанти девіатора напружень.

Для розв'язку структурної задачі для дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі застосовуються діаграми «напруження – деформація» [173,174].

Для побудови діаграм деформування взяті середнє значення модуля пружності і середня міцність. Значення механічних характеристик деревини та параметри діаграм, наведених на рис. 5.3, зведені до табл. 5.2.

Використовуючи дані табл. 5.2, були побудовані діаграми деформування деревини, що показані на рис. 5.3.

Таблиця 5.2 – Параметри для діаграм деформування деревини в умовах її нагрівання

Температура нагріву, $T, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт зниження міцності на стиск, ρ_{wc}	Коефіцієнт зниження міцності на розтяг, ρ_{wt}	Коефіцієнт зниження модуля пружності на розтяг, ρ_{Et}	Коефіцієнт зниження модуля пружності на стиск, ρ_{Ec}	Міцність деревини на розтяг (які паралельно до волокон), f_w , МПа	Модуль пружності деревини (який паралельно до волокон), E_w , ГПа
20	1	1	1	1	123	12

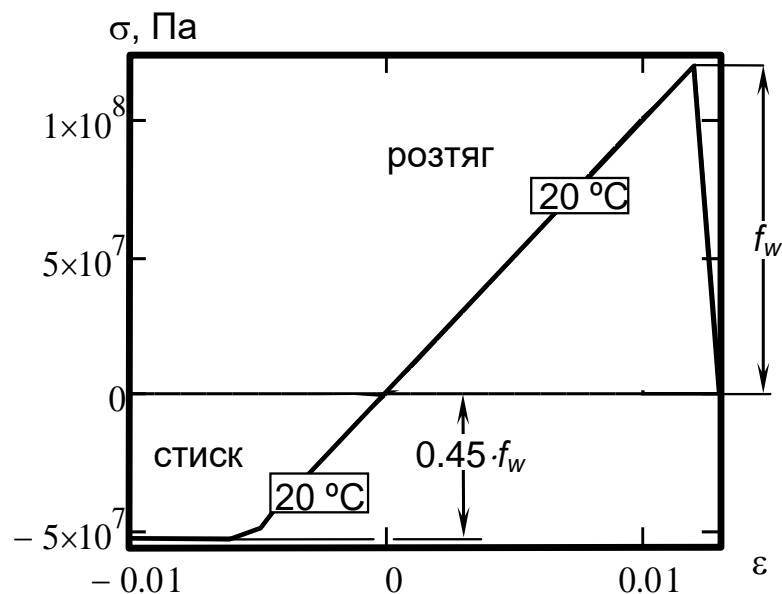


Рис. 5.3. Діаграми деформування деревини при стисканні та розтягу.

5.2.2. Розрахункові схеми досліджуваних дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери

Згідно із прийнятими положеннями розрахунку тепловий вплив пожежі враховується представленням балки без обвугленого шару, що конфігурується за допомогою ліній Без'є з використанням формул (4.3) – (4.12). На рис. 5.4 наведена універсальна схема для представлення дерев'яних балок без обвугленої частини у результаті теплового впливу пожежі. Для врахування найбільшої кількості випадків, прийнято, що балка опирається шарнірно.

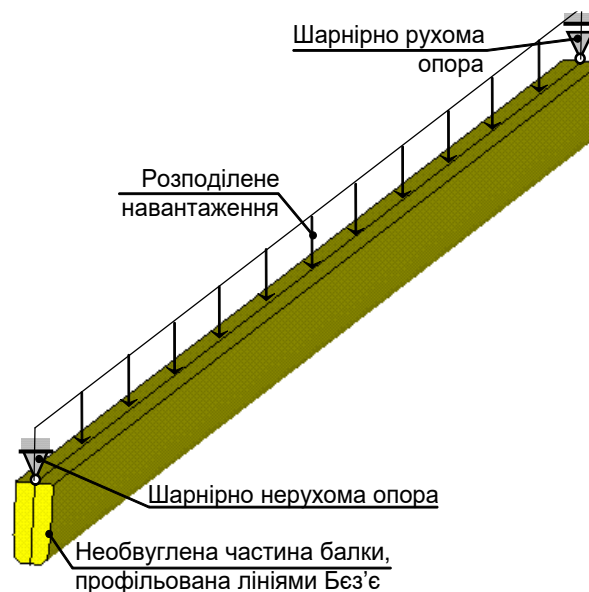


Рис. 5.4. Зовнішній вигляд та схема розташування конструктивних елементів дерев'яних балок без обвугленої зони.

Основні технічні параметри дерев'яних балок, потрібних для розрахунків наведені у табл. 5.3 [173,174].

Таблиця 5.3 – Основні технічні параметри деревини

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Порода деревини балки	Сосна		
Міцність на розтяг деревини балки	f_k	123	МПа
Міцність на стискання деревини балки	f_k	53	МПа

Продовження таблиці 5.3 – Основні технічні параметри деревини

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Модуль пружності деревини балки при розтягу	E_d	10,5	ГПа
Густина деревини балки	ρ_d	530	кг/м ³
Гранична вологість деревини балки	u	< 3	%

Для рішення задачі напружено-деформованого стану з використанням методу кінцевих елементів було застосовано гексаедричний КЕ лагранжевого типу [169-173], геометрична конфігурація якого показана на рис. 5.5.

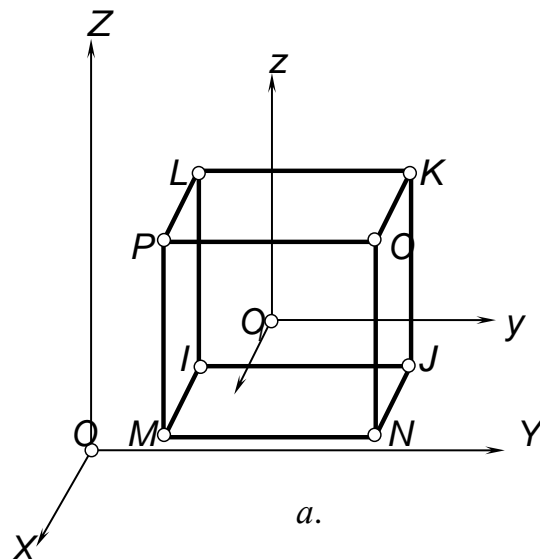


Рис. 5.5. Геометрична конфігурація кінцевого елемента гексаедричного типу.

Інтерполяційні вирази для КЕ є поліномами Лагранжа і описуються за допомогою рівнянь [169-173]:

$$\begin{aligned}
 u_x &= \frac{1}{8}(u_{LX}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KX}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IX}(1-x)(1-y)(1-z)) ; \\
 u_y &= \frac{1}{8}(u_{LY}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KY}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IY}(1-x)(1-y)(1-z)) ; \quad (5.20) \\
 u_z &= \frac{1}{8}(u_{LZ}(1-x)(1-y)(1-z) + u_{KZ}(1-x)(1-y)(1-z) + \dots + u_{IZ}(1-x)(1-y)(1-z)) ;
 \end{aligned}$$

Тип прийнятих КЕ та вигляд їхньої геометричної конфігурації вибрані враховуючи рекомендації, наведені у роботах [169-173]. На рис. 2.8 наведений вигляд його геометричної конфігурації.

Вибраний тип КЕ у точках інтегрування розуміє визначення характеристик НДС, що подані у табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Параметри напружено-деформованого стану у вузлах кінцевих елементів дерев'яних балок

Параметр НДС	Одиниці виміру
Нормальні напруження у шарах балки	Па
Дотичні напруження у шарах балки	Па
Головні напруження у шарах балки	Па
Максимальні дотичні напруження у шарах балки	Па
Напруження Мізеса у шарах балки	Па
Гідростатичні напруження	
Пружні деформації	
Пластичні деформації	
Головні пружні та головні пластичні деформації	
Деформації Мізеса	
Загальні деформації	
Температурні деформації	
Переміщення	м

Використовуючи основні прийняті положення щодо кінцевих елементів, були побудовані кінцево-елементні схеми дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.

На рис.5.6 наведена типова кінцево-елемента схема, побудована для одного зі сполучень параметрів досліджуваних балок.

Для скорочення обсягу розрахунку в кінцево-елементній схемі врахована симетрія балки за допомогою введення додаткових механічних в'язів.

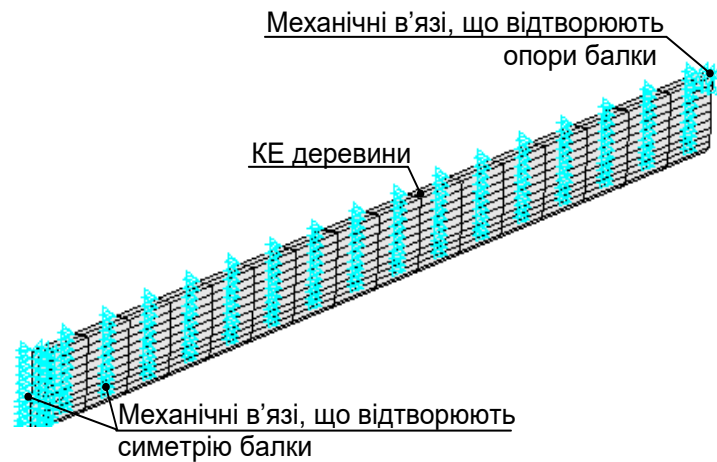


Рис 5.6. Кінцево-елементна схема до статичної задачі щодо міцності дерев'яної балки перерізом $100 \times 200 \times 4800$ мм із вогнезахисним облицюванням завтовшки 10 мм із обвугленою зоною після впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв.

Кожного разу для розрахунку змінювалися параметри, а форма перерізу балки змінювалася у залежності від геометричних параметрів перерізу, товщини вогнезахисного облицювання та часу впливу стандартного температурного режиму пожежі. На рис. 5.7 наведені кінцево-елементні схеми перерізів балок із різними сполученнями вказаних параметрів.

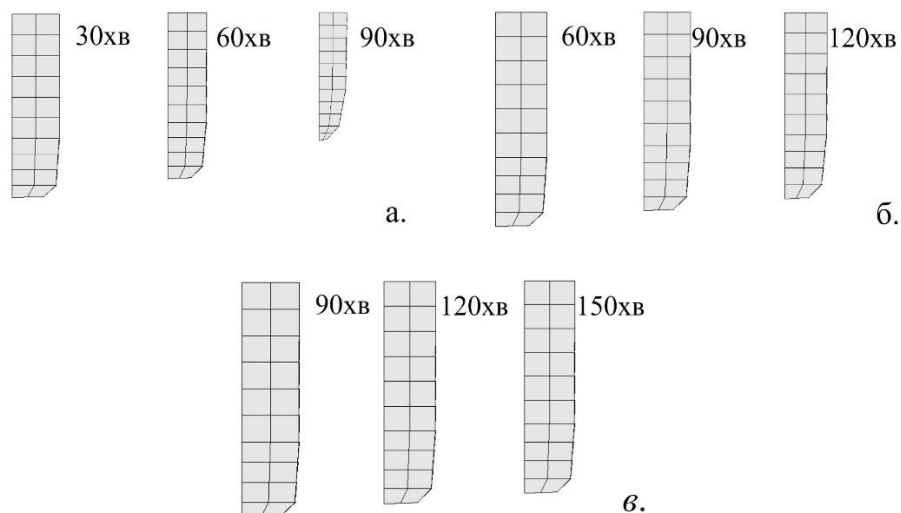


Рис. 5.7. Кінцево-елементні схеми перерізів балок з товщиною вогнезахисту 10 мм із різними сполученнями геометричних та конструктивних параметрів:
 а – балка перерізом 100×200 мм, б – балка перерізом 200×400 мм; в – балка перерізом 300×600 мм

5.2.3. Результати розрахунку досліджуваних дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.

Після проведення розрахунків були отримані результати для різних балок із різною товщиною вогнезахисного облицювання. Номенклатура балок, для яких були проведені розрахунки, наведена у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Номенклатура дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, для яких були проведені розрахунки

Позначення балки	Переріз, ширина×висота ($a \times b$), мм	Коефіцієнт перерізу, A_p/V , м ⁻¹	Товщина вогн. облицюв, w , мм
Б-100-0	100×200	0.025	0
Б-100-10	100×200	0.025	10
Б-100-20	100×200	0.025	20
Б-200-0	200×400	0.013	0
Б-200-10	200×400	0.013	10
Б-200-20	200×400	0.013	20
Б-300-0	300×600	0.008333	0
Б-300-10	300×600	0.008333	10
Б-300-20	300×600	0.008333	20

Розрахунок проводиться для моментів часу зі стандартного ряду класів вогнестійкості: $R 15$, $R 30$, $R 45$, $R 60$, $R 90$, $R 120$, $R 150$.

У якості прикладу отриманих даних у результаті розрахунку вказаних дерев'яних балок наведено розподілення поздовжніх нормальних напружень у балці Б-100-10 після 60 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі. На рис. 5.8 наведено розподіл поздовжніх нормальних напружень при досягненні рівня навантаження $\mu_{fi} = 0.5$.

Несучу здатність зручно відслідковувати за графіком максимального прогину балки. Типовий графік залежності величини максимального прогину від прикладеного навантаження наведений на рис. 5.9.

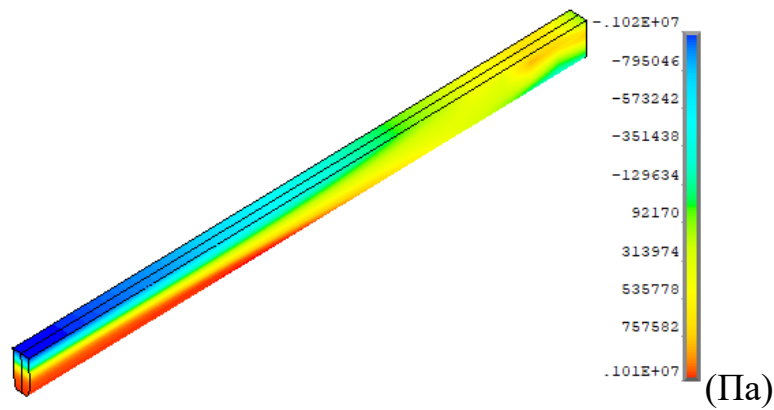


Рис. 5.8. Розподіл поздовжніх нормальних напружень у балці Б-100-10 при досягненні рівня навантаження $\mu_{fi} = 0.5$

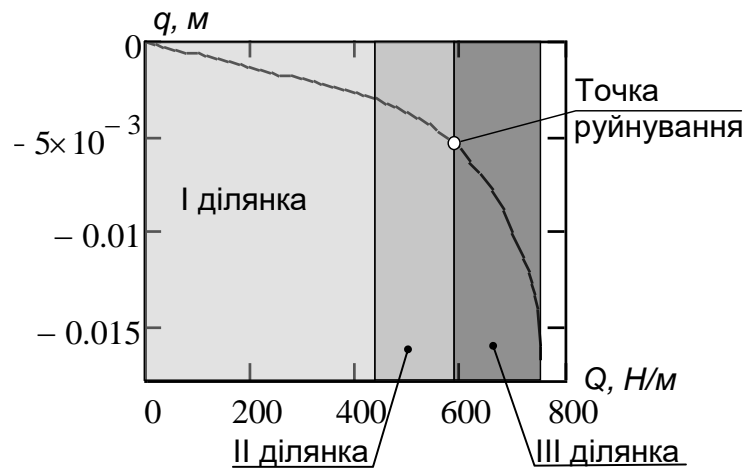


Рис. 5.9. Типовий графік залежності величини максимального прогину від прикладеного навантаження

Механізм руйнування дерев'яної балки, яка піддана навантаженню, полягає у виникненні зон локальної пластичної деформації, лавиноподібне нарощування яких приводить до повної деструкції досліджуваної балки. Умовно поведінку дерев'яної балки є можливість розділити на декілька етапів. На початковому етапі балка деформується у пружній зоні при пропорційній залежності між зусиллями та деформаціями, що можна прослідкувати на першій ділянці графіка прогину балки, поданому на рис. 5.9. Наступний етап деформування балки пов'язаний із початком утворення та розвитку пластичних деформацій, що відповідає другій ділянці графіка прогину балки, поданому на рис. 5.9. На останньому етапі деформування балки виникає лавиноподібне

утворення пластичних деформацій балки, що призводить до її руйнування. Даному етапу відповідає третя ділянка графіка прогину балки, поданому на рис. 5.9. Для подальших розрахунків було зроблене припущення, що умовна критична точка, в якій фіксується втрата несучої здатності балки на границі між другою та третьою ділянками графіка прогину балки, поданому на рис. 5.9.

На рис. 5.10 подані графіки максимальних прогинів балок із різними конфігураціями зони неушкодженої деревини перерізу для балок із шириною перерізу 100 мм (Б-100-0, Б-100-10, Б-100-20 згідно з табл. 5.5).

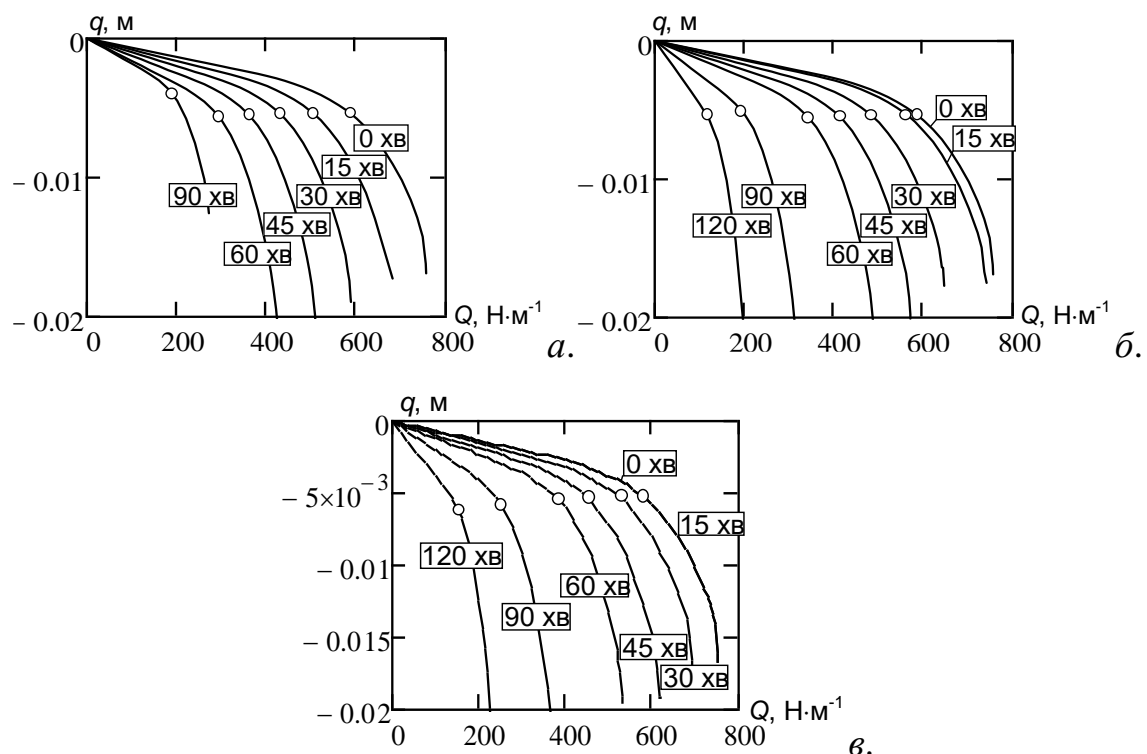


Рис. 5.10. Графіки максимальних прогинів балок із різними конфігураціями зони неушкодженої деревини перерізу у даний момент часу теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі для балок із перерізом 100×200 мм та різною товщиною вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери: *a* – 0 мм; *б* – 10 мм; *в* – 20 мм.

На графіках рис. 5.10 позначені точки втрати несучої здатності в досліджуваних балках згідно із рис. 5.9. Подібні графіки були отримані і для інших балок згідно із табл. 5.5. На основі отриманих графіків було проаналізовано

зміну несучої здатності балок у залежності від часу експонування за умов стандартного температурного режиму та рівня прикладеного до них навантаження. На рис. 5.11 наведені графіки зниження несучої здатності у залежності від вказаних параметрів.

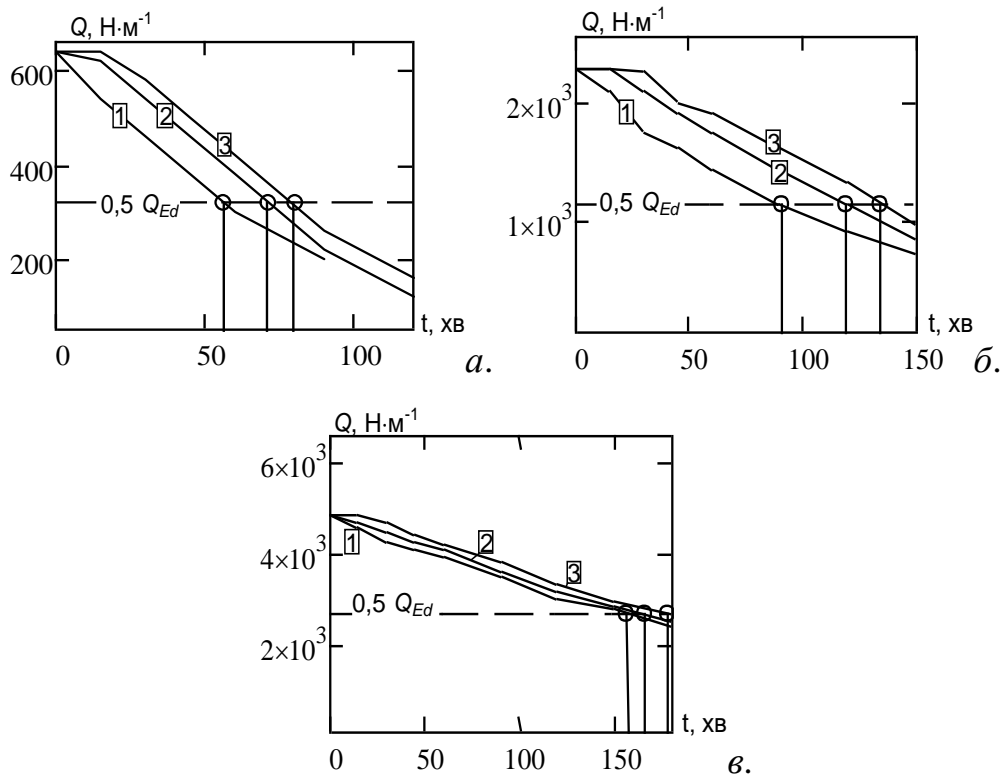


Рис. 5.11. Несуча здатність дерев'яної балки прямокутного перерізу 100×200 мм (а), дерев'яної балки прямокутного перерізу 200×400 мм (б), дерев'яної балки прямокутного перерізу 300×600 мм (в) із різною товщиною вогнезахисної фанери у якості облицювання: 1 – 0 мм; 2 – 10 мм; 3 – 20 мм.

Аналізуючи графіки, подані на рис. 5.11, можна помітити, що вони подібні до графіків рис. 4.6. Проте прогнозують для досліджуваних дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери більшу вогнестійкість на 20 – 30 хв, при цьому похибка складає не більше 14 %. Це вкладається у ієрархічну схему методів, що рекомендована нормативними документами [89,99]. Тож можна зробити висновок, що запропоновані методи є достатньо точними та

їх застосування дозволяє ефективно прогнозувати вогнестійкість дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери.

5.3. Висновки до розділу

У результаті проведених досліджень була розв'язана задача розробки методик розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери із використанням виявлених закономірностей. Запропоновані методики дозволяють визначити проектні дані щодо товщини вогнезахисного облицювання просоченою фанерою для забезпечення класу вогнестійкості, необхідного для досліджуваних балок.

У процесі проведення досліджень одержано такі основні результати:

1. На основі виявлених закономірностей побудовані номограми для визначення часу настання граничного стану втрати несучої здатності дерев'яними балками прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що дозволяють їх використання для розрахункової оцінки вогнестійкості даних балок у діапазоні класів вогнестійкості від R 15 до R 120.

2. Розроблені довідникові таблиці для визначення часу настання граничного стану втрати несучої здатності дерев'яними балками прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, які можна використовувати для встановлення відповідності даних балок до заданого класу вогнестійкості у діапазоні товщини вогнезахисного облицювання на основі просоченої фанери від 0 до 20 мм.

3. Запропонована методика реалізації уточненого розрахункового методу оцінки вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери з використанням методу кінцевих елементів у нелінійній постановці.

4. Отримані результати показали достатню точність запропонованих спрощених методів, оскільки при їх порівнянні із результатами, отриманими за уточненим методом, мають похибку не більше 14 %.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеним науковим дослідженням, представлені результати розв'язку актуального науково-практичного завдання щодо розробки розрахункового методу оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок.

На основі виявлених закономірностей залежності зон обвуглювання від конструктивних параметрів балок, а також часу експонування даних балок за стандартним температурним режимом пожежі, було отримано такі наукові результати досліджень, до яких слід віднести:

1. На основі аналізу статистичних даних про пожежі виявлено, що істотні ризики, пов'язані з пожежною небезпекою, зберігаються у будівлях із дерев'яними балками. Показано, що перспективним засобом для підвищення стійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу є їх захист шляхом багат шарового вогнезахисного облицювання на основі фанери, просоченої вогнезахисною речовиною. Але питання вогнезахисних властивостей даних систем захисту для дерев'яних балок розкриті недостатньо і потребують розширення в частині удосконалення методів розрахункової оцінки вогнестійкості, що стримує впровадження розрахункових методів проектування вогнестійкості дерев'яних балок з такими системами.

2. В ході досліджень було розроблено методику експериментальних досліджень та проведені експериментальні дослідження фрагментів дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери товщиною у діапазоні від 0 до 20 мм протягом 15, 30, 60 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі.

3. Шляхом математичного моделювання виявлено, що швидкості обвуглювання з торцевої частини перерізу складає 0.96 мм/хв, а швидкість обвуглювання бокової частини балки, відповідно, складає 0.31 мм/хв. Також встановлено, що час затримки початку обвуглювання дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням складає, в залежності від товщини облицювання, від 11 до 20 хв з торцевої сторони перерізу та від 15 до 25 хв з бічної сторони

перерізу, що використовується як частина початкових даних для реалізації розробленого методу оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок.

4. Запропонована математична модель контуру обвугленої зони у перерізі дерев'яної балки із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери дає більш точні результати, оскільки відхилення між даними, отриманими розрахунковим та експериментальним шляхом, не перевищують 6 %.

5. Виявлена закономірність геометричних параметрів обвугленої зони від найбільш значущих параметрів: відношення площі обігрівної поверхні балки до її об'єму (A_b/V), товщини облицювання (d), коефіцієнту навантаження (μ_{fi}) у вигляді: $U_{fi} = 286.99 - 5914.7 \cdot A_b/V - 2.57 d - 196.99 \mu_{fi} + 206.25 \cdot A_b/V d + 170.45 \cdot A_b/V \mu_{fi} + 0.261 d \mu_{fi} - 17.045 \cdot A_b/V d \mu_{fi}$.

6. На основі виявленої закономірності розроблена ієрархічна система методів оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок.

7. На основі розроблених довідникових таблиць і номограм, а також уточненого теоретичного підходу з використанням методу кінцевих елементів показана висока точність спрощених розрахункових методів прогнозування вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери. З огляду на те, що відносна похибка складає не більше 14%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Building material preferences with a focus on wood in urban housing: durability and environmental impacts Can. J. For. Res. 2015. С. 1617- 1627.
2. Is wood construction sustainable? URL: <https://buildwithstrength.com/sustainability/>. [електронний ресурс].
3. Michael Green: why we should build wooden skyscrapers? URL: https://www.ted.com/talks/michael_green_why_we_should_build_wooden_skyscrapers?language=ru. [електронний ресурс].
4. Мурашева В. Дерев'яні багатоповерхівки ростуть на очах загалу. URL: <http://estp-blog.ru/rubrics/rid-18911/>. [електронний ресурс].
5. Treet, Bergen. URL: <https://www.skyscrapercenter.com/building/treet/16540>. [електронний ресурс].
6. Степанов Б. А. Материаловедение для профессий, связанных с обработкой дерева: Учебник. М.: Профобриздат, 2001. 328 с.
7. Бамбукова архітектура. URL: <http://www.berlogos.ru/article/bambukovayaarhitektura/>. [електронний ресурс].
8. Anonymous Stora Enso CLT Technical brochure. Stora Enso Division Wood Products. URL: <https://www.clt.info/wp-content/uploads/2017/09/CLT-by-Stora-Enso-Technicalmanual-EN.pdf>.
9. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2021 року. ДСНС України. Київ: ВДіСП УкрНДІЦЗ, 2021.
10. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Положення про розслідування причин аварій (обвалень) будівель, споруд, їх частин та конструктивних елементів. ДБН В.1.2-1-95.[Чинний від 1995.06.01.] – К.: Спільний наказ Держкоммістобудування України та Держнаглядохоронпраці України. –9 с. (Державні будівельні норми).
11. Першаков В. М., Лисницька К. М. Урахування ризиків при проектуванні будівель та споруд. Міське середовище – ХХІ сторіччя. Архітектура. Будівництво. Дизайн: Тези доповідей І Міжнародного науково–практичного конгреса, м. Київ, 10–14 лютого 2014 р. – К.: НАУ, 2014.– С. 198–199.

12. Першаков В. М., Лисницька К. М. Урахування ризиків виникнення аварії при проектуванні будівель та споруд. Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. збірник / – К.: НАУ, 2014. – Вип. 2 (12). – С. 335–344.
13. Барабаш М. С., Усольцев І. О. Особливості моделювання висотних будівель з урахуванням впливу динамічних навантажень / М. С. Барабаш, І. О. Усольцев // Наук.-вироб. журнал: Будівництво України. – 2012. – №1. – С. 24–28.
14. Барабаш М. С., Мисливець К. М. Аналіз надійності висотної будівлі з урахуванням ризику прогресуючого обвалення / Барабаш М. С., Мисливець К. М. // Науково-виробничий журнал: Будівництво України. – 2010, – №5. – С. 37–41.
15. Осипенко В. І., Поздєєв С. В., Тищенко І. Ю. Будівельні матеріали та їх поведінка при дії високих температур. / Навчальний посібник. – Черкаси: 2012 – 202 с.
16. Roytman V. M., Pasman H. J. and Lukashevich I. E. The Concept of Evaluation of Building Resistance against combined hazardous Effects “Impact–Explosion–Fire” after Aircraft Crash. – Fire and Explosion Hazards. Proceedings of the Fourth International Seminar, 2003, London– derry, NI, UK, pp. 283–293.
17. Малишев О. М., Костира Н. О. Визначення категорійності технічного стану будівельних конструкцій в залежності від природних та технологічних впливів. Науково-технічний збірник “Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві”. Вип. 41, 2012.
18. Першаков В. М. Протипожежний захист висотних будівель / Першаков В. М., Семироз Н. Г., Лисницька Е. Н. Всеукраїнська наук.-практ. конференція. Іноваційний потенціал світової науки – ХХІ сторіччя. Т.2. Запоріжжя. 2014. – С. 72–74.
19. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд безпека експлуатації. ДБН В.1.2-9-2008 [Чинний від 2008-10-01] Мінрегіонбуд України. Київ, 2008. № 37 – 21 с.(Державні будівельні норми).

20. Ширшов В. Г. Надійність будівельних конструкцій відповідальних об'єктів при впливі особливого виду динамічного навантаження Автореф. дис. канд. техн. наук. Київ, 2003.
21. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02027, DOI: 10.1051/matecconf/201711602027.
22. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. ДСТУ 2272:2006. [Чинний від 2006-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України 2006. – 30 с. – (Національний стандарт України). дата прийняття: 09.06.2006 дата початку дії: 01.07.2007
23. Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-3:1999, NEQ) ДСТУ Б В.1.1-13:2007 [Чинний від 01.01.2008] Мінрегіонрозвитку та будівництва України Київ. 2008 № 64 – 6 с. – (Національний стандарт України).
24. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. ДСТУ Б В.1.1-4-98*. [Чинний від 1998.10.28]. Київ: Держбуд, 1998. 44 с. (Державний стандарт України). Київ, 1999.
25. BS EN 316:2009 Wood fire boards. Definition, classification and symbols. (Деревно-волокнисті плити (ДВП) – Визначення, класифікація і символи) – 12 р.
26. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН В.1.1-7:2016 – [Чинний від 2017-06.01.] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України - 87 с. – (Державні будівельні норми України).
27. Новгородченко А. Ю., Поздеев С. В., Змага Я. В., Луценко Ю. В. Методика дослідження зразків-фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням. IX Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ. 2018. С. 194–195.

28. Змага Я. В. Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням: дис. кандидата техн. наук: 21.06.02 / Змага Яна Василівна. – Х., 2016. – 134 с.

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

30. Некора О. В. Оцінка вогнестійкості залізобетонного ригеля за допомогою експериментально-розрахункового метода / О. В. Некора, Б. А. Медвідь, А. М. Омельченко, С. В. Поздєєв // Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. - 2016. - № 2. - С. 60-66.

31. Поздєєв С. В. Оцінка вогнестійкості ненесучих стін за розрахунковими методами Єврокоду / С. В. Поздєєв, Ю. А. Отрош, В. В. Демешок, М. О. Кропива // Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво. - 2015. - Вип. 3. - С. 277-283.

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

33. Савицький М. В. Багатоповерхове дерев'яне домобудування: сучасні тенденції та майбутні перспективи / М. В. Савицький, С. Є. Шехоркіна, Т. Д. Нікіфорова, К. В. Шляхов // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепр, 2017. – Вып. 99. – С. 153-159.

34. Наказ МВС України «Про затвердження Порядку організації внутрішньої, гарнізонної та караульної служб в органах управління і підрозділах Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій» від 07.10.2014 №1032.

35. Наказ МВС України “Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж”, зареєстрований в Мін’юсті 10.07.2018 за № 801/32253 (із змінами). від 26.04.2018 № 340

36. Постанова КМУ “Про затвердження Порядку ведення обліку надзвичайних ситуацій.” від 09.10.2013 № 738.

37. Наказ ДСНС України “Про затвердження методичних рекомендацій із складання та використання оперативних планів і карток пожежогасіння” від 23.09.2011 № 1021.

38. Аналіз надзвичайних ситуацій в Україні за 2011 – 2021 роки. <https://dsns.gov.ua/uk/operational-information/133842> [електронний ресурс].

39. Кулешов М. М., Уваров Ю. В., Олійник О. Л., Пустомельник В. П., Беліков А. С. Пожежна безпека будівель і споруд: Навчальний посібник – Харків, 2004.- 271 с.

40. Рожков А. П. Пожежна безпека: навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти України / Рожков А. П. // – Київ. Пожінформтехніка, 1999. – 256 с.

41. Новак С. В., Григор’ян Б. Б., Нефедченко Л. М., Абрамов О. О. Оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій та виробів. Методи випробувань: Навчальний посібник. – Черкаси: АПБ, 2011. – 124 с.

42. Пушкаренко А. С. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур/ Пушкаренко А. С., Васильченко О. В.; Навчальний посібник.-Харків: АП-БУ,2001.-166с.

43. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об’єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. ДБН В.1.2-2:2006 [Чинний від 2006-07-03] (Державний будівельні норми). Київ: УкрНДІпроектстальконструкція, 2006.– 20 с.

44. Дерев'яні конструкції. Основні положення. ДБН В.2.6-161:2017 [Чинний від 2017-06-06]. – К.: Мінрегіонбуд – (Державний будівельні норми), Київ – 2017. – 117 с.

45. Защита древесины. Классификация. ГОСТ 20022.2-2018. [Действующий 2019-04-01]. – К.: СНПЛЗД, – (Межгосударственный стандарт), – 2019. – 17 с.

46. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд. ДСТУ Б В.3.1-2:2016 (Державний стандарт України) [Чинний від 2016-10-02]. К.: УкрНДІпроектстальконструкція – Київ – 2016. – 20 с.

47. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. ДБН В.1.2-14:2018. (Державні будівельні норми) [Чинний від 2018-08-02]. – К.: УкрНДІпроектстальконструкція – Київ – 2018. – 36 с.

48. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. ДБН В.1.2-7-2008. [Чинний від 2008-06-21]. – К.: НДІБК – (Державний будівельні норми), Київ – 2008.

49. Стійкість деревини та виробів з деревини. Природна стійкість суцільної деревини. Частина 2. Настанови щодо природної стійкості та просочності окремих порід, що мають значення в Європі. ДСТУ EN 350-2:2004 (EN 350-2:1994, IDT). [Чинний від 2004-06-28]. (Національний стандарт України) – К.: Держспоживстандарт. - Київ – 2010. – 9с.

50. Стійкість деревини та виробів з деревини. Визначення класів використання. Частина 1. Загальні положення. ДСТУ EN 335-1:2006 (EN 335-1:2006; IDT). - [Чинний від 2010-12-28]. (Національний стандарт України) – К.: УкрНДІНанобіотехнологій. - Київ – 2010. – 9с.

51. Стійкість деревини та виробів з деревини. Визначення класів небезпеки біологічного ураження. Частина 2. Застосування до деревних плит

ДСТУ EN 335-2:2010 (EN 335-2: 2006; IDT). - [Чинний від 2010-12-28]. - (Національний стандарт України) – К.: УкрНДІНанобіотехнологій. - Київ – 2010.

52. Плити деревинні. Визначення модуля пружності та міцності під час згинання. ДСТУ EN 310:2003. (Державний стандарт) - [Чинний від 2003-10-02]. – К.:ТК-18. – Київ. - 2003. – 10 с.

53. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire-protected wood, taking into account its humidity. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. Том 3, № 2. С. 106-115.

54. Новгородченко А.Ю. Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнесійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням: дис.кандидата наук: 261 Пожежна безпека/ Черкаси 2020 – 164 с.

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

56. Малыгина В. С., Огнестойкость конструкций из дерева и полимеров. / В. С. Малыгина, А. В. Долженко // Научно-технический сборник “Современные технологии, материалы и конструкции в строительстве”. – 28 - 30 с.

57. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157:2010 [Чинний від 2012-01-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2012. – 80 с. – (Національний стандарт України).

58. Плити деревинностружкові з орієнтованою стружкою (OSB). Терміни та визначення понять, класифікація та технічні вимоги. ДСТУ EN 300:2008 (EN 300:2006, IDT) [Чинний від 2010-01-01]. Київ: УкрНДІ «Ресурс» (Державний стандарт України), 2011. – 12 с.

59. Новак С., Харченко І., Нефедченко Л. Ювілей стандартного температурного режиму пожежі. Будівництво та безпека. 2008. № 5 (9). С. 36–37.

60. Пожежна класифікація будівельних виробів і будівельних конструкцій. Частина 1. Класифікація за результатами випробувань щодо реакції

на вогонь. - ДСТУ EN 13501-1:2016 (EN 13501-1:2007+A1:2009, IDT). - [Чинний від 2016-08-11]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 80 с. – (Національний стандарт України).

61. Культурно-видовищні та дозвілєві заклади – ДБН В. 2.2-16:2019 - [Чинний від 2019-11-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 99 с. – (Національний стандарт України).

62. Заклади освіти – ДБН В.2.2-3:2018 - [Чинний від 2018-09-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 63 с. – (Національний стандарт України).

63. Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення – ДБН В.2.2-9-2009 - [Чинний від 2010-10-01]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2010. – 69 с. – (Національний стандарт України).

64. Пінчевська О. О. Анотації лекцій з деревинознавства для студентів 2-го курсу напряму деревооброблювальні технології. Змістовний модуль № 2. Хімічні та фізичні властивості деревини. / Пінчевська О. О., Буйських Н. В., Зражва С.Г. // НУБіП України, ННІ ЛіСПГ, лісогосподарський факультет, кафедра технології деревообробки. - Київ – 2013.

65. Бондаренка М. І. План-конспект лекцій курсу «Будівельні матеріали та виробы». - Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка, м.Глухів 2015р. – 127 с.

66. Фещук Ю. Л. Прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням: дис. канд. наук. Спеціальність 21.06.02 «Пожежна безпека». галузь знань – 261 «Пожежна безпека». Львів 2018. – 162 с.

67. Андрієнко В. М., Бут В. П., Жартовський В. М., Жартовський С. В., Маладика І. Г., Цапко Ю. В. Вогнезахист деревини та виробів з неї: Навчальний посібник. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля МНС України, 2009.- 254 с.

68. Дмітрієва Н. В. Вогнебіостійкі епоксидні композиційні матеріали для дерев'яних конструкцій: автореф. дис. канд. техн. наук / Дмітрієва Н. В.- 21.06.02/ХТДУБА.-К.,2005.-с.20.

69. EN 313-1: 1996 (confirmed in 2015). Plywood – Classification and Terminology – Classification (Клеєна фанера – Класифікація і термінологія. Частина 1: Класифікація).

70. Плити деревинні. Характеристичні значення для використання в конструкціях. Частина 1. Плити деревинностружкові з орієнтовною стружкою (OSB), деревинностружкові та деревинно волокнисті ДСТУ EN 12369-1:2008. (EN 12369-1:2001, IDT). [Чинний від 2008-08-15]. – К.: УкрНДІ «Ресурс» – (Державний стандарт України), Київ – 2008.

71. Лісоматеріали конструкційні. Класи міцності. ДСТУ EN 338:2004. (EN 338:2003, IDT). [Чинний від 2004-11-15]. – К.: УкрНДНЦ – (Державний стандарт України), Київ – 2004.

72. Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей. ГОСТ 16363-98.- [Чинний від 01.09.2000], прийнятий від 07.03.2000, на замінуГОСТ 16363-76

73. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. ДСТУ 8829:2019. - [Чинний від 2019-02-27]. – К.: ТК-25, – (Державний стандарт України), Київ – 2019.

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

75. Цапко Ю. В. Перспективи підвищення ефективності вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів/ Цапко Ю. В.-Зб. наук. пр.-Львів, ЛДУБЖД, 2006.- Вип.8.-с.206-210.

76. Фанера. Технічні умови ДСТУ EN 636:2014 (EN 636:2003, IDT) [Чинний від 2015-04-01] УкрНДІ «Ресурс». 10 с. Київ-2015.

77. Патент України на винахід № 88538. Клейова композиція для виготовлення фанери та фанерної продукції / Бехта П.А., Потапова О.А., Седлячік Я. – Опубл. 26.10.09. Бюл. № 20.

78. Фанера спільного призначення з зовнішніми шарами з шпона листяних пород. Технічні умови. ГОСТ 3916.1-96. МКС 79.060.10 * ОКП 55 1200 [Чинний від 1998-01-01].– (Міждержавний стандарт) – 1998.

79. Шпон лущений. Технічні умови. ГОСТ 99-1996 МКС 79.060.10. [Актуалізація чинності від 2008-03-15].

80. Техніко-економічне обґрунтування. Технічні вимоги до матеріалів, які використовується на підприємстві. Смола карбамідоформальдегідна марки КФМТ-15Ф. ТУ 25.471-42-94. [Чинний від 1994-10-01] Мінрегіонбуд України. Київ, 1994.

81. Соколенко К. І. Підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів із застосуванням вогнезахищеної деревини: Соколенко К. І.-Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: УкрНДІПБ України.- Київ. 2005.-с.22.

82. Бринь О. І., Чернецький М. Л., Бехта П. А. Спосіб виготовлення вогнестійкої фанери. Патент № 60940. [Чинний від 2011-06-25].

83. Бехта П. А., Кшивецький Б. Я. Спосіб прогнозування міцності та довговічності з'єднань деревини клеями на основі полівінілацетату. Патент України на винахід № 98515. /– Опубл. 25.05.12. Бюл. № 10.

84. Тимик Д. В., Бехта Н. С., Бехта П. А. Спосіб виготовлення фанери. Патент № 28773. [Чинний від 2007-12-25].

85. Bekhta P.A., Hiziroglu S. Properties of particleboard panels manufactured from treated wheat straw. Proceeding of 2012 IUFRO Conference. Division 5. Forest Products. 8-13 July, Estoril, Lisbon, Portugal, 2012. P. 222.

86. EN 1363-2: 1999 Fire resistance tests – Part 1: General requirements. - Європейський стандарт. (Випробування на вогнестійкість. Частина 1: Загальні вимоги).

87. Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012 [Чинний від 2013-07-01] Мінрегіонбуду України від 21.12.2012 р. № 652. 90 с. (Національний стандарт України).

88. Шналь Т. М. Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: навч. посіб. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2006. 220 с.

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

90. Бехта П. А., Біць Г. Є. Модифікування фенолоформальдегідних смол алюмомісткими речовинами для виготовлення фанери // Наукові праці Лісівничої академії наук України. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2008. – Вип. 6. – С. 155-158.

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

92. ISO 834-1:2000 Fire resistance tests – Element of building construction - Part 1: General requirements (Випробування на вогнестійкість – Частина 1: Загальні вимоги).

93. Фанера вогнестійка для авто-, вагоно-, контейнеробудування ДСТУ ГОСТ 33065:2018 [Чинний від 01. 03. 2018] ДП «Український науково-дослідний та навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДУЦ»). (Державний Стандарт України) – с. 20.

94. EN 301:2006 Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements.

95. Вироби з деревини та деревних матеріалів. Параметри шорсткості поверхні. ГОСТ 7016-2013 (МКС 79.020) [Чинний 2014-01-01]. – К.: ТК-25, – (Міждержавний стандарт) – 2014.

96. Bekhta P.A., Korkut S., Hiziroglu S. Effect of Pretreatment of Raw Material on Properties of Particleboard Panels Made from Wheat Straw. BioResources, 2013, 8(3): 4766-4774.

97. Будівельні матеріали. Метод випробування на розповсюдження полум'я. ДСТУ Б В.2.7-70-98. (ГОСТ 30444-97). - [Чинний від 1998-05-25]. – К.: ЦНДІБК. – (Державний стандарт України), Київ - 1998.

98. Захист від пожежі. Матеріали будівельні. Методи випробування на поширення полум'я по вертикальних поверхнях у горизонтальному напрямку. ДСТУ Б В.1.1-10:2004 [Чинний від 2005-04-01] Мінрегіонбуд України. Київ, 2005. –с.22.

99. Єврокод 1: Дії на конструкції – Частина 1-2: Загальні дії – Дії на конструкції під час пожежі ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 [Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions -Actions on structures exposed to fire] [Чинний від 2013-07-01].-мінрегіонбуд України (Національний стандарт України) – Київ 2013.

100. Наказ МВС України від 26.12.18 № 1064 «Про затвердження правил з вогнезахисту». [Електронний ресурс] – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-19#Text>.

101. EN 1365-3: 1999 Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3 Beams. (Випробування на вогнестійкість елементів, що несуть навантаження – Частина 3: Балки).

102. П4732789 США. МКИ427/393.3 Hauser Peter J. Flame resistant cotton bland fabrics.

103. Новгородченко А. Визначення температурних розподілень дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням. / С. Поздєєв, А. Новгородченко, С. Федченко, І. Неділько // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. – С. 200-202.

104. Смола епоксидна марки ЕХД ТУ 2225-512-00203521-98. [Чинний від 03.05.1998]. – К. -6 с. (Технічні умови).

105. Zmaha M., Pozdieiev S., Nekora O., Zmaha Y., Sidnei S. Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading

International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020). Bristol: IOP Publishing Ltd, 2020. Volume 1021. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012031/pdf>.

106. Споруди та фрагменти будівель. Методи натурних вогневих випробувань. Загальні вимоги ДСТУ Б В. 1.1-18-2007 [Чинний від 2007-10-26] Міністерства регіонального розвитку та будівництва України № 286 – (Національний стандарт України). Київ – 9 с.

107. Заготовки з деревини хвойних порід. Технічні вимоги ГОСТ 9685-61 [Чинний від 1994-03-01] ДК 674.032.002.63:006.354 (Технічні умови).- Київ – 1994. 14 с.

108. Новгородченко А. Ю., Поздєєв С. В., Змага Я. В., Некора В. С. Температурні режими зразків-фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням при вогневих випробуваннях у портативній печі. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України). Черкаси. 2018. С. 50–53.

109. Змага Я. В., Змага М. І., Некора О. В., Поздєєв С. В., Швиденко А. В. Методика оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням. Монографія. ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019 – 120 с.

110. Змага М. І., Змага Я. В. Опис фрагмента зразка дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисної фанери. IX Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. – с. 150 – 152.

111. Патент США №225637.Кл.427/297/В05 Д 3/00, В 05 Д 3/12. Процесс пропитки древесины. Richardson Neil Li. Process fo wood tratmment (Domtar Unc).

112. Бехта П. А, Ортинська Г. Є. Склеювання шпону підвищеної вологості модифікованою фенолоформальдегідною смолою // Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наукових праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 10. – С. 254-260.

113. Вироби з деревини та деревних матеріалів. Параметри шорсткості поверхні ДСТУ ГОСТ 7016:2018 (ГОСТ 7016-2013, IDT) [Діючий від 13.12.2018] – Київ, 2018.
114. Дерев'яні клеєні конструкції. (Електронний ресурс) <https://www.derevo.info/content/detail/4997>.
115. Смола епоксидна модифікована марка КДЖ-5-20 ТУ 2225-542-00203521-98. [Чинний від 08.05.1998]. Київ 1999. – 4 с.
116. Вогнезахисні речовини. [електронний ресурс] <https://solomonplus.com.ua/ua/kompozit-f1>
117. Смола епоксидна модифікована марка УП-5-132 ТУ 2225-542-00203521-98; [Чинний від 09.05.1998]. Київ 1999. – 4 с.
118. Смола епоксидна модифікована марка К-293 ТУ 2225-542-00203521-98; [Чинний від 13.08.1998]. Київ 1998. – 6 с.
119. Feshchuk Yu., Pozdieiev S., Zmaga Ya., Novhorodchenko A. Estimation of Credibility of the Results of Measuring Temperature within Specimens of Wood Columns Obtained During Fire Tests. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. № 7 (4.3). P. 284–287.
120. Фещук Ю. Л., Поздеев С. В., Нижник В. В., Новгородченко А. Ю. Метод интерполяции температурных полей в сечении фрагментов деревянных колонн с огнезащитной облицовкой. *Вестник Кокшетауского технического института Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан*. Кокшетау, 2018. № 3 (31). С. 64–73.
121. Змага М. І., Змага Я. В. Опис фрагмента зразка дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисної фанери *Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 150-152.
122. EN 319: 1993 Particleboard and fireboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board.

123. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Fedchenko S., Zmaha Y. Physico-chemical properties of fire-protective plywood under high temperatures. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. ТОМ 5 № 1. С. 129-132. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.129.132>

124. Поздєєв С. В. Чисельне дослідження несучої здатності дерев'яного перекриття в умовах пожежі. / С. В. Поздєєв, В. В. Демешок, А. Ю. Залевська, М. П. Рога // Тези доповідей 6-ї міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті.» м. Харків 2017. – С.148-149.

125. Новгородченко А. Ю. Дослідження температурних режимів нагріву фрагментів дерев'яних балок з вогнезахисним облицюванням OSB-плити / А. Ю. Новгородченко, С. В. Поздєєв, О. С. Алексєєва, П. І. Заїка, Ю. В. Луценко // Наукове видання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація : збірник наукових праць. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. – № 3. С 100 – 107.

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

127. Плити деревностружкові. Визначення та класифікація (EN 309:1992, IDT) ДСТУ EN 309:2003. (Державний стандарт) - [Чинний 2003-10-02]. – К.:ТК-18. – Київ. - 2003.

128. Round and sawn timber. – Terminology – Part-10: Terms relating to discolouration and fungal attack (EN 844-10).

129. Тлумачний документ до Директиви 89/106 ЄЕС. Основна вимога № 2. Пожежна безпека.

130. Новгородченко А. Ю. Верифікація математичних моделей зміни товщини обвугленого шару дерев'яної балки з вогнезахистом / Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» НУЦЗ України, м. Харків. С. 352.

131. Lu W., Makelainen P. Advanced Steel Structures. Structural Fire Design / Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures Publications 29.- Espoo, 2003.
132. White Robert H. Fire Performance of Hard wood Species: Paper prepared for presentation at 11th IUFRO World Congress (2000, August 7-12, Kuala Lumpur, Malaysia).-2000.-13p.
133. Gribniak V., Bacinskas D, Kaklauskas G.: Numerical simulation strategy of reinforced concrete tunnel bearing members in fire. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2006, 1 (1), p. 5–9.
134. Bednarek Z., Ogrodnik P.: Deflection prediction of reinforced concrete beams by design codes and computer simulation. *Engineering Structures* Volume 56, November 2013, Pages 2175-2186
135. Korhonen E. S. Natural fire modeling of large spaces / Helsinki University of Technology.-2000.
136. Multi- Residential Timber Framed Construction, Fire Protection for Timber Framing at Door and Window Penetrations// *Information Bulletin*.-2000.-No.4.
137. Leong Poon J. P. Literature review on the contribution of fire resistant timber constructions to heater lease rate / Warrington fire research. WFRP Project No.20633. Version 2b.-78p.
138. Lie T. T. A method of assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns / *Canadian J. of Civil Eng* 4:161-169,1977.
139. König J. and Walleig L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2: A design model for standard fire exposure// *Tratek, Rapport I 0001001*.-Stocholm.-June 2000.
140. König J. A design model for load-carrying timber frame members in walls and floor exposed to fire/Proceedings of CIB W18. Meeting 33. Paper 33-16-1,2000.
141. Silcock W. H. and Shields T. G. Relating Char to Fire Severity Conditions/ *Fire and Materials*,25,9-11,2001.
142. Jones B., Gerlich H. and Buchanan A. Modelling the Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires and Standard Furnace

Tests Proceedings of the 4th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (Melbourne, Australia, 2002).

143. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y., Fragmentary illumination of results of fire test of wooden beams with facing by fire-retardant plywood *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Том 4, № 1. С. 91 – 96. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.1.-91-96>

144. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Том 4, № 2. С. 97 – 105. DOI:

145. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Результати випробувань зразків фрагментів дерев'яних балок за стандартним температурним режимом. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗ України, 2020. – С. 132-133.

146. Деєв С. С. Геометричне моделювання об'єктів, процесів та явищ / С. С. Деєв, В. В. Кривцов // До питання використання кривих Без'є зв'язаними дугами та параметричними поліномами при викладенні курсу «Машинна графіка»// Вісник національного університету водного господарства та природокористування № 3 (59), 2012, С. 3-10.

147. Конструкції будинків і споруд. Конструкції дерев'яні клеєні. Загальні технічні умови ДСТУ Б В.2.6-151:2010[Діючий від 14.12.2010]. Науково-технічний комітет «Будстандарт», Київ, 2011, - 12 с.

148. Поздєєв С. В., Змага М. І., Новгородченко А. Ю., Змага Я. В. Дослідження обвуглювання дерев'яних балок із різними вогнезахисними системами *Матеріали 8-ї міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Частина 2. С. 190-191.

149. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Дослідження обвуглювання вогнезахисних дерев'яних балок. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика»*. Харків: НУЦЗ України, 2019. С. 289-290.

150. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Дослідження глибини обвуглювання зразків фрагментів дерев'яних балок, облицьованих вогнезахисною фанерою. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 198 – 200.*

151. Demeshok V. Calculation method for evaluating the fire resistance of timber slabs with use the finite elements method / Demeshok V., Zalevs'ka A., Lutsenko Yu. Tyshchenko O. // XVIII International Scientific Conference «New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics» - A collective monograph edited by Jarosiaw Boryca, Dorota Musiai Series: Monografie Nr 68. Czksktochowa 2017. С. 405-410.

152. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / О. М. Нуянзін, С. В. Поздєєв, В. М. Андрієнко [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2013. – № 13. – С. 91–100.

153. Новгородченко А. Ю. Обґрунтування математичної моделі процесу обвуглювання зразків-фрагментів дерев'яної балки з вогнезахисним облицьованням / С. В. Поздєєв, А. Ю. Новгородченко, Ю. Ю. Підгорецький І. А. Неділько // Наукове видання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація : збірник наукових праць. Том 3 №2 (2019) – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, С.90-97.

154. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire prtected wood. *Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. – С. 256-258.

155. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Натурні випробування фрагменту-зразка дерев'яної балки з облицюванням вогнезахищеною фанерою. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 212-214.

156. Новгородченко А. Ю., Поздєєв С. В., Некора О. В., Луценко Ю. В., Медвідь Б. Ю. Дослідження обвуглювання дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням на основі плит OSB // Наукове видання. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: збірник наукових праць. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. № 4. С. 34 – 42.

157. Новак С. та ін. Удосконалення нормативної бази на методи випробування будівельних конструкцій на вогнестійкість/ Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека- 2007», Черкаси, 2007. – с. 273–275.

158. Новгородченко А. Ю., Поздєєв С. В., Некора О. В. Аналіз параметрів обвуглювання дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». 2019. № 16. С. 53 – 56.

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

160. Поздєєв С.В. Розвиток наукових основ визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. НУЦЗ України, 2012. – 385 с.

161. Мосалков И. Л. Огнестойкость строительных конструкций / Мосалков И. Л., Плюснина Г. Ф., Фролов А. Ю. – К.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.

162. 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.

163. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.

164. Херн Д., Бейкер М. Компьютерная графика и стандарт OpenGL. М.: Вильямс, 2005. — 1168 с.

165. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов / отв. ред. Г. С. Писаренко; 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с.

166. Шуп Т. Прикладные численные методы в физике и технике: пер. с англ. С. Ю. Славянова / под ред. С. П. Меркурьева. М.: Высш. шк., 1990. 255 с.

167. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Книга по требованию, 2013. 203 с.

168. Сидняев Н. И. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособ. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 463 с.

169. Zmaha M. Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. ТОМ 5 № 2. С. 125-135. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135>.

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

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

172. Pozdieiev S., Sidnei S., Nekora O., Fedchenko S. Research of Wooden Bearing Structures Behavior Under Fire Condition with Use Advanced Methods of Fire Resistance Calculation Considering Eurocode 5 Recommendation, International Scientific Conference on Woods & Fire Safety, WFS 2020: Wood & Fire Safety pp 326-332.

173. The study of carrying capacity of timber slabs with use the finite elements method / V. Demeshok, A. Zalevs'ka, E. Tychenko, Y. Zmaga // Materials Science, Engineering and Chemistry. MATEC Web of conferences. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings»/ Transbud-2017, Kharkiv, Ukraine. – P. 1 – 4.

174. H. E. Hjelm, Yield Surface for Grey Cast Iron Under Biaxial Stress, Journal of Engineering Materials and Technology, vol.116, issue.2, pp.148-154, 1994.

ДОДАТОК А

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Zmaha M., Pozdieiev S., Nekora O., Zmaha Y., Sidnei S. Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading *International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport (EET 2020)*. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2020. Volume 1021. Режим доступу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012031/pdf>.
2. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y., Fragmentary illumination of results of fire test of wooden beams with facing by fire-retardant plywood *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Том 4, № 1. С. 91 – 96. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.1.-91-96>
3. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. Том 4, № 2. С. 97 – 105. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105>
4. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Fedchenko S., Zmaha Y. Physico-chemical properties of fire-protective plywood under high temperatures. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. ТОМ 5 № 1. С. 129-132. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.129.132>
5. Zmaha M. Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. ТОМ 5 № 2. С. 125-135. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135>.
6. S. Sidney, V. Kobko, S. Fedchenko, M. Zmaha, N. Zaika. Improvement of the zone method of checking the fire resistance of hollow slabs. . Collection of scientific

papers. "Emergency situations: prevention and elimination." Cherkasy: ChIPB named after the Heroes of Chernobyl, NUTSZ of Ukraine, 2022. VOLUME 6 No. 1. P. 95-103. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102>.

7. Змага М. І., Змага Я. В., Некора О. В., Поздєєв С. В., Федченко С. М., Швиденко А. В. Методика оцінка вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням. *Монографія*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019 – 125 с

8. Поздєєв С. В., Некора О. В., Змага М. І., Змага Я. В., Новгородченко А. Ю. Вогнезахисний спосіб на основі просоченої фанери. *Патент на корисну модель № 143304*, опубліковано 27.07.2020 року, бюлетень № 14.

9. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire-protected wood, taking into account its humidity. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. Том 3, № 2. С. 106-115.

10. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y., Novgorotcenko A. Investigation of carbonization of wood beams with different fire protection systems. *Збірник наукових праць. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. Том 3, № 1. С. 87-92.

Апробація матеріалів дисертації:

1. Поздєєв С. В., Змага М. І., Новгородченко А. Ю., Змага Я. В. Дослідження обвуглювання дерев'яних балок із різними вогнезахисними системами *Матеріали 8-ї міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Частина 2. С. 190-191.

2. Змага М. І., Змага Я. В. Опис фрагмента зразка дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисної фанери *Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека*

та захист». Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. С. 150-152.

3. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Дослідження обвуглювання вогнезахисних дерев'яних балок. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика»*. Харків: НУЦЗ України, 2019. С. 289-290.

4. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Дослідження глибини обвуглювання зразків фрагментів дерев'яних балок, облицьованих вогнезахисною фанерою. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»* Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 198 – 200.

5. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Результати випробувань зразків фрагментів дерев'яних балок за стандартним температурним режимом. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. Харків: НУЦЗ України, 2020. – С. 132-133.

6. Pozdieiev S., Zmaha M., Zmaha Y. Dependence of burning of materials from fire prtected wood. *Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. – С. 256-258.

7. Поздєєв С. В., Змага М. І., Некора О. В., Змага Я. В., Сідней С. О. Дослідження можливостей забезпечення вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням з просоченої фанери. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність на транспорті»*. Харків: УкрДУЗТ, 2020. С. 96-98.

8. Zmaha M., Zmaha Y. Analysis of fire protection cladding methods for wooden beams. *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference «The world of science and inovation»*. London: Cognum Publishing House, 2021. – P. 159-1634.

9. Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Натурні випробування фрагменту-зразка дерев'яної балки з облицюванням вогнезахисною фанерою. *Матеріали*

XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 212-214.

10. Тищенко Є. О., Поздєєв С. В., Змага М. І., Змага Я. В. Дослідження впливу антипіренів на властивості вогнезахисної фанери. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 220 – 222.*

11. А. В. Субота, М. І. Змага, О. В. Некора, Я. В. Змага, Є. О. Тищенко. Результати експериментальне досліджень параметрів регресійних залежностей товщини обвуглювання. *Матеріали 9-ої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» Харків, 17-19 листопада 2021 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2021, 176-178 с.*

12. Zmaha Y., Zmaha M. Calculating the fire resistance of exposed wood members. *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 188 - 189.*

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший заступник начальника Інституту
державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту

« 4 »  Валерій БОРИС
2022 р.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи Змаги Миколи Івановича на тему «Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок»

Комісія у складі: голови комісії – начальника науково-дослідного центру протипожежного захисту доктора технічних наук, членів комісії – заступника начальника центру – начальника відділу нормативно-технічного забезпечення кандидата технічних наук, Фещука Юрія Леонідовича заступника начальника начальника відділу нормативно-технічного забезпечення кандидата технічних наук, Балло Ярослава Вячеславовича склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи на тему «Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок» має теоретичне та практичне значення для доповнення до нормативно-правової бази, щодо визначення межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням вогнезахищеною фанерою.

В дисертаційній роботі розроблено та запропоновано розрахунковий метод оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери. Врахування запропонованих нововведень дозволило значно підвищити межу вогнестійкості дерев'яних балок із вогнезахисним облицюванням вогнезахисною фанерою за рахунок врахування конфігурації зони обвуглювання та зменшення вартості проведення випробування й обсяг робіт.

Рекомендації розрахункового методу оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок, впроваджено у діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту під час виконання науково-дослідних робіт та розробки нормативно-правових актів.

Голова комісії:

Вадим НІЖНИК

Члени комісії:

Юрій ФЕЩУК

Ярослав БАЛЛО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник Випробувального центру

ТОВ «ТЕСТ»



А.М. Бондар

2022 р.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи Змаги Миколи Івановича
за темою «Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності
вогнестійкої фанери для дерев'яних балок»

Даний акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Змаги Миколи Івановича було застосовано у Випробувальному центрі ТОВ «ТЕСТ», зокрема результати досліджень обвуглювання дерев'яних балок із різними вогнезахисними системами, результати досліджень глибини обвуглювання зразків фрагментів дерев'яних балок, що облицьовані вогнезахисною фанерою, положення «Методики оцінки вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним облицьованням на основі просоченої фанери» були використані під час оцінювання параметрів вогнестійкості несучих та огорожувальних конструкцій з деревини.

В цілому впровадження результатів дисертаційної роботи Змаги М.І., сприяло підвищенню якості та ефективності випробувальних робіт.

Акт не призначено для використання під час фінансових операцій.

Завідувач лабораторії ВЦ ТОВ «ТЕСТ»
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

А.В. Довбиш

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Черкаського інституту пожежної
безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного
захисту України
кандидат технічних наук, професор

Віктор ГВОЗДЬ

«17» _____ 2022 року

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи на тему «Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок»

Розробник Змага Микола Іванович, з однієї сторони та начальник кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці кандидат технічних наук, доцент Березовський Андрій Іванович з іншої сторони, склали акт про те, що результати дисертаційної роботи на тему: «Розрахунковий метод оцінювання вогнезахисної здатності вогнестійкої фанери для дерев'яних балок» має теоретичне та практичне значення для освітнього процесу.

В дисертаційній роботі розкрито вплив закономірностей зміни геометричних параметрів зони обвуглювання дерев'яних балок прямокутного перерізу із вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери на розрахунковий метод визначення межі вогнестійкості. І за допомогою математичного моделювання розроблена ієрархічна система методів розрахункової оцінки вогнестійкості дерев'яних балок облицюваних вогнезахисною фанерою на основі створених довідникових таблиць, номограм.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес при підготовці фахівців освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Стійкість будівель і споруд при пожежі» в розділі теми «Способи підвищення вогнестійкості дерев'яних конструкцій». Також при підготовці фахівців освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» під час вивчення дисципліни «Стійкість будівель та споруд в умовах надзвичайних ситуацій» в розділі таких тем «Визначення вогнестійкості дерев'яних конструкцій» та «Вогнестійкість дерев'яних конструкцій та способи її підвищення.» (протокол кафедри №7 від 27.12.2021).

Впровадження результатів роботи, а саме: методика прогнозування вогнестійкості дерев'яних балок прямокутного перерізу з вогнезахисним облицюванням на основі просоченої фанери, що забезпечує актуальний характер навчання та високий науково-методичний рівень викладання даних дисциплін і дозволяє підвищити якість проведення лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти.

Начальник кафедри безпеки
об'єктів будівництва та охорони праці
кандидат технічних наук, доцент

Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ

Розробник

Микола ЗМАГА