

**ВОГНЕСТІЙКІСТЬ ВИСОТНИХ БУДИНКІВ З ДЕРЕВИНИ***Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, Тетяна СКЛЯРОВА<sup>2</sup>*<sup>1,2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037<sup>1</sup> mykhailovskyi.dv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3151-8630><sup>2</sup> skliarova.ts@knuba.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-9162-3999>

**Анотація.** Будівництво будинків і споруд з застосуванням конструкцій з цільної, клеєної та поперечно-клеєної деревини набувають все більшого розповсюдження. Досвід проектування, зведення та експлуатації таких будинків різноманітної висотності в усьому світі підтверджує доцільність їх використання. Особливого розповсюдження останнім часом набуло зведення каркасних і панельних багатоповерхових будинків з клеєної та поперечно-клеєної деревини.

В Україні досі існує застаріла думка про неможливість зведення висотних будинків з несучими конструкціями з деревини.

Важливим і актуальним питанням є проектування та зведення багатоповерхових каркасних та панельних будинків з клеєної деревини та поперечно-клеєної деревини. За останнє десятиріччя такі будинки набувають все більшого розповсюдження не тільки в Європі, але й у Канаді, США, Австралії, Японії тощо.

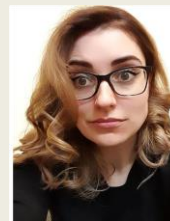
Однак в Україні зведення багатоповерхових будівель з застосуванням клеєної та поперечно-клеєної деревини зіштовхується з великою кількістю бюрократичних обмежень, пов'язаних з відсутністю сучасного досвіду такого будівництва та чіткої сформованої нормативної бази.

В цій статті проаналізовано чинну нормативну базу з позиції обмежень і перспектив їхнього вирішення щодо такого будівництва і проектування. Запропоновано вирішення задачі розрахунку висотних будинків з клеєної деревини та панельних з поперечно-клеєної деревини з урахуванням мінімально необхідної вогнестійкості основних несучих конструкцій.

Наведено алгоритм розрахунку несучих конструкцій висотних будинків з каркасом із клеєної деревини та панельних з поперечно-клеєної



**Денис МИХАЙЛОВСЬКИЙ**  
професор кафедри металевих і дерев'яних конструкцій,  
д.т.н., професор



**Тетяна СКЛЯРОВА**  
асистент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій

Деревини за допомогою методу скінченних елементів та аналітичного розрахунку. Обґрунтовано доцільність та можливість проектування та зведення каркасних і панельних багатоповерхових будинків з клеєної та поперечно-клеєної деревини.

Деревина є пожежонебезпечним будівельним матеріалом, тим не менш, будівля з дерев'яним каркасом може тривалий час витримувати пожежу, не руйнуючись, оскільки обвуглювання поверхонь захищає конструкції від вогню.

Основна проблема протипожежного захисту полягає в тому, щоб технічні рішення відповідали вимогам будівельних норм. Інші ключові аспекти пов'язані з візуальними параметрами, довговічністю, міркуваннями щодо впливу на здоров'я та екологічної безпеки.

Для елементів дерев'яних конструкцій основною причиною втрати несучої здатності при пожежі є зменшення поперечного перерізу внаслідок горіння деревини.

**Ключові слова.** Висотні будинки; клеєна деревина; поперечно-клеєна деревина; панельний будинок; вогнестійкість конструкцій; розрахункова схема; метод скінчених елементів; напружено-деформований стан; вогнестійкість; захист деревини від займання.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Деревина як будівельний матеріал має багатовікову історію, яка доводить її надійність, довговічність та безпечність. Будівництво будинків і споруд з застосуванням конструкцій з цільної, клеєної та поперечно-клеєної деревини набувають все більшого розповсюдження. Досвід проектування, зведення та експлуатації таких будинків різноманітної висотності в усьому світі [1-3] підтверджує доцільність їх використання. Широкого розповсюдження набувають і конструкції з клеєної (КД) та поперечно-клеєної деревини (ПКД) в якості панелей, з яких зводяться багатоповерхові будинки [4, 5].

Цьому сприяє той факт, що клеєна та поперечно-клеєна деревина ефективно акумулює в собі позитивні властивості деревини як конструкційного матеріалу, насамперед відносно високу міцність, і дозволяє в значній мірі нівелювати недоліки цільної деревини. Клеєна та поперечно-клеєна деревина - це конструкційні матеріали, одержані в результаті склеювання під тиском дощок з вологістю 6-10%, у випадку з ПКД розташованих взаємно перпендикулярно. В англійській літературі поперечно-клеєну деревину називають «Cross laminated timber» (CLT), в німецькій ПКД отримали назву «Brettsperholz» (BSP), також відома назва X-Lam.

Вітчизняний досвід застосування панелей з ПКД в житловому будівництві практично відсутній. Запущене в Україні у м. Коростень виробництво конструкцій з КД та панелей з ПКД слабо вплинуло на їх широке застосування, чому суттєво впливає відсутність вітчизняної нормативної бази, щодо розрахунку та проектування як окремих конструкцій так і будівель з них в цілому.

В нормативних документах Європейського союзу (Єврокод-5 або EN 1995-1-1:2008 [6]), України (ДБН В.2.6-161:2017

[7])) наявні вказівки, щодо проектування конструкцій з КД однак поки відсутні вказівки щодо проектування та розрахунку конструкцій з використанням панелей з ПКД. Виключення становлять національні нормативні документи Австрії (*ÖNORM B 1995-1-1* [8]). та Німеччини (*DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12* [9]), в яких містяться вказівки щодо розрахунку панелей з ПКД.

Детальний огляд існуючих методик розрахунку панелей з ПКД представлено в [10, 11]. В [12] надано сучасну інженерну методику розрахунку панелей з ПКД методом скінчених елементів (МСЕ) з моделюванням ортотропними пластинчастими СЕ №41 з використанням приведених модулів пружності, коригуванням коефіцієнтів Пуассона таким чином щоб зберігалась умова існування в деревини пружного потенціалу.

Основним нормативним документом який обмежує зведення висотних будівель є ДБН В.2.2-15:2019 [13]. В пункті 8.2 міститься таблиця 3 згідно якої поверховість наряду залежить від ступеня вогнестійкості будівлі. Для зведення будинків вищих за 5 поверхів слід забезпечити I, II або III ступінь вогнестійкості будинку. Визначення ступеню вогнестійкості регламентується ДБН В.1.1-7:2016 [14]. В таблиці 1 пункту 5.3 [14] визначення ступеня вогнестійкості будівель і споруд визначається класом вогнестійкості основних несучих конструкцій. Таким чином, можна підсумувати, що забезпечивши необхідні класи вогнестійкості основних несучих конструкцій можна досягти потрібну для висотного будівництва ступінь вогнестійкості будівлі чи споруди. Так для будівель III ступеня вогнестійкості основні несучі конструкції мають відповідати класам вогнестійкості: стіни несучі та сходових кліток – REI 120; колони - R 120; перекриття міжповерхові - REI 45. Також цими вимогами чітко регламентуються групи будівельних конструкцій за межею поширення вогню. Для будівель III ступеня вогнестійкості слід застосовувати будівельні конструкції в вертикальних елементах (колони і стіни) групу за межею поширення вогню

М0. Група за поширенням вогню конструктивного матеріалу визначається згідно вимог додатку Д [14].

З всього вище наведеного можна зробити висновок про нагальну потребу в розробці державних норм проектування висотних будівель з КД та панелей з ПКД з урахуванням особливостей національних традицій проектування, кліматичних особливостей, сировинної бази деревини, традицій конструювання вузлових з'єднань

Мета дослідження – даної роботи є представлення інженерної методики розрахунку вогнестійкості основних несучих конструкцій.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Аналіз існуючої інженерної нормативної методики розрахунку вогнестійкості елементів конструкцій з клеєної деревини.

2. Чисельний аналіз існуючої інженерної методики розрахунку вогнестійкості основних несучих конструкцій будівель і споруд.

3. Розробка рекомендацій щодо розрахунку багатопверхових будівель з клеєної деревини та поперечно-клеєної деревини з урахуванням вогнестійкості методом скінчених елементів як системи «основа-фундамент-надфундаментна конструкція».

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Аналіз існуючої інженерної нормативної методики розрахунку вогнестійкості елементів конструкцій з клеєної деревини.

Наразі розрахунок вогнестійкості конструкцій з цільної клеєної та поперечно-клеєної деревини регламентується ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157 [15]. В даному нормативному документі, який є фактично адаптованим перекладом EN 1995-1-2:2016 [16], міститься алгоритм розрахунку вогнестійкості конструкцій з деревини починаючи від збору навантажень, визначення розрахункових значень міцності матеріалу під час пожежі і завершуючи безпосереднім розрахунком за граничними станами, яку наведено нижче.

### 1.1. Визначення розрахункових значень навантаження під час пожежі

Постійне та тимчасове навантаження під час пожежі можна визначити з формул:

$$G_{d,fi} = \eta_{fi} G_d \quad (1)$$

$$Q_{d,fi} = \eta_{fi} Q_d, \quad (2)$$

де  $G_{d,fi}$  - розрахункове значення постійного навантаження під час пожежі;  
 $G_d$  - розрахункове значення постійного навантаження за нормальних температур;  
 $\eta_{fi}$  - коефіцієнт зниження, що визначає рівень навантаження під час пожежі і розраховується за формулами (3-5);  
 $Q_{d,fi}$  - розрахункове значення тимчасового навантаження під час пожежі;  
 $Q_d$  - розрахункове значення тимчасового навантаження за нормальних температур.

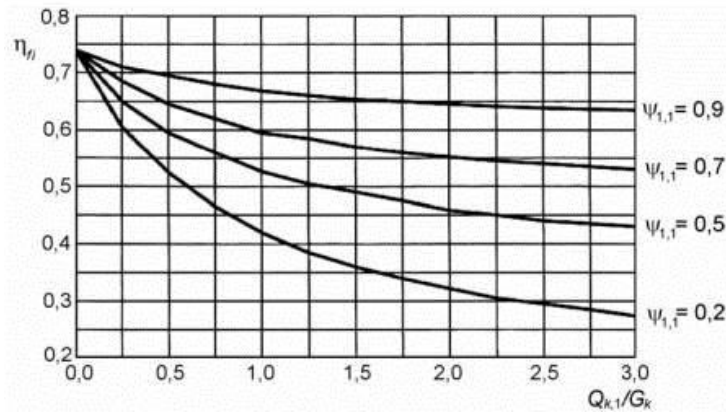
Коефіцієнт зниження, що визначає рівень навантаження під час пожежі визначається як менше значення за формулами:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{ki}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{ki}}; \quad (3)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}}; \quad (4)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}; \quad (5)$$

де  $Q_{k,1}$  - характеристичне значення головного тимчасового навантаження;  
 $G_k$  - характеристичне значення постійного навантаження;  
 $\gamma_G$  - частковий коефіцієнт постійного навантаження;  
 $\gamma_{Q,1}$  - частковий коефіцієнт тимчасового навантаження;  
 $\psi_{fi}$  - коефіцієнт сполучення навантажень для циклічних та квазіпостійних значень, наведених як  $\psi_{1,1}$  та  $\psi_{1,2}$ ;  
 $\xi$  - коефіцієнт зниження для несприятливої дії постійного навантаження  $G$



**Рис. 1.** Зміна коефіцієнта зниження  $\eta_{fi}$  залежно від співвідношення навантаження  $Q_{k,1}/G_k$   
**Fig. 1.** Change in the reduction factor  $\eta_{fi}$  depending on the load ratio  $Q_{k,1}/G_k$

Згідно з ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 [17] «Основи проектування конструкцій» рекомендовані величини коефіцієнтів  $\psi$  для більш загальних дій можуть прийматись з таблиці 1.

Розрахунок конструктивних елементів без геотехнічних дій слід перевіряти з використанням часткових коефіцієнтів  $\gamma$ , що наведені в додатку А ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 [17]:

$\gamma_{G,sup} = 1,10$  – для несприятливого постійного навантаження;  $\gamma_{G,inf} = 0,90$  – для сприятливого постійного навантаження;

$\gamma_{Q,1} = 1,5$  – для провідного тимчасового навантаження;  $\gamma_{Q,i} = 1,5$  – для супутніх тимчасових навантажень;

$\gamma_{G,sup} = 1,35$  – для несприятливого постійного навантаження;  $\gamma_{G,inf} = 1,15$  – для сприятливого постійного навантаження;  $\gamma_{Q,1} = 1,5$  – для провідного тимчасового навантаження;  $\gamma_{Q,i} = 1,5$  – для супутніх тимчасових навантажень;

$\xi = 0,85$  - коефіцієнт зниження для несприятливої дії постійного навантаження  $G$ .

**Табл. 1.** Рекомендовані величини коефіцієнтів  $\psi$  для будівель та споруд.  
**Table 1.** Recommended values of coefficients  $\psi$  for buildings and structures.

Дія	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Прикладені навантаження на будівлі, категорія (див. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-1)			
Категорія А: житлові будинки, житлові площі	0,7	0,5	0,3
Категорія В: офісні площі	0,7	0,5	0,3
Категорія С: площі зібрання великої кількості людей	0,7	0,7	0,6
Категорія D: торговельні площі	0,7	0,7	0,6
Категорія Е: склади	1,0	0,9	0,8
Категорія Н: дахи	0	0	0
Снігові навантаження на будівлях країн-членів Європейського комітету з стандартизації, для місць, що розташовані на висоті $H > 1000$ м над рівнем моря	0,7	0,5	0,2
Снігові навантаження на будівлях країн-членів Європейського комітету з стандартизації, для місць, що розташовані на висоті $H \leq 1000$ м над рівнем моря	0,5	0,2	0
Вітрові навантаження на будівлі	0,6	0,2	0

Якщо проаналізувати дану методику, можна чітко стверджувати, що величина навантажень при розрахунку вогнестійкості значно зменшується.

### 1.2. Визначення розрахункових значень міцності та жорсткості деревини під час пожежі

Для перевірки несучої здатності розрахункове значення міцності визначається за формулою:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (6)$$

де  $f_{d,fi}$  – розрахункова міцність деревини під час пожежі;

$f_{20}$  – 20% -й квантиль розрахункового значення міцності за нормальної температури, визначається за формулою (8);

$k_{mod,fi}$  – коефіцієнт зміни під час пожежі, визначається за формулами (10-12);

$\gamma_{M,fi}$  – коефіцієнт надійності за матеріалом під час пожежі.

Для перевірки жорсткості розрахункове значення модуля пружності визначається за формулою:

$$E_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{E_{20}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (7)$$

е  $E_{d,fi}$  – розрахункове значення модуля пружності під час пожежі;

$E_{20}$  – 20% -й квантиль розрахункового значення модуля пружності за нормальної температури, визначається за формулою (9);

$k_{mod,fi}$  – коефіцієнт зміни під час пожежі, визначається за формулами (10-12);  $\gamma_{M,fi}$  – коефіцієнт надійності за матеріалом під час пожежі.

Коефіцієнт зміни під час пожежі  $k_{mod,fi}$  враховує зниження міцності та жорсткості за підвищених температур і заміщає коефіцієнт зміни за нормальних температур  $k_{mod}$ .

Значення коефіцієнта надійності за матеріалом, для цільної та клеєної деревини під час пожежі становить  $\gamma_{M,fi} = 1$ .

20%-й квантиль розрахункового значення міцності за нормальної температури визначається за формулою:

$$f_{20} = k_{fi} f_k, \quad (8)$$

де  $k_{fi}$  – коефіцієнт, що береться згідно [15] і наведено в табл. 2;

$f_k$  – характеристичне значення міцності деревини

20%-й квантиль розрахункового значення модуля пружності за нормальної температури визначається за формулою:

$$E_{20} = k_{fi} E_{0,05}, \quad (9)$$

де  $k_{fi}$  – коефіцієнт, що береться згідно [15] і наведено в табл. 2;

$E_{0,05}$  – 5%-й квантиль модуля пружності.

**Табл. 2.** Значення коефіцієнту  $k_{fi}$ .

**Table 2.** The value of the coefficient  $k_{fi}$ .

Матеріал	$k_{fi}$
Суцільна деревина	1,25
Клеєна деревина	1,15
Деревинні плити	1,15
Фанеровані пиломатеріали (LVL)	1,1
З'єднання кріпленнями на зсув бічних дерев'яних елементів з деревними плитами	1,15
З'єднання кріпленнями на зсув бічних сталевих елементів	1,05
З'єднання поздовжньо навантаженими кріпленнями	1,05

Для  $t > 20$  хв коефіцієнт зміни під час пожежі  $k_{mod,fi}$  слід приймати за формулами: для міцності на згин

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r}; \quad (10)$$

для міцності на стиск

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r}; \quad (11)$$

для міцності на розтяг та модуля пружності

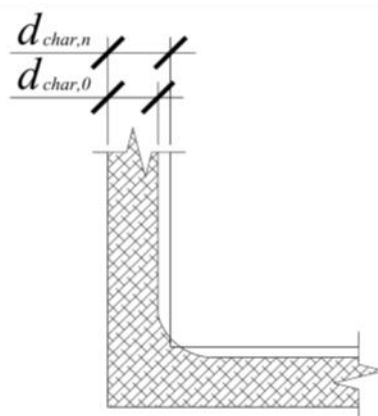
$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \frac{p}{A_r}; \quad (12)$$

де  $p$  - периметр залишкового поперечного перерізу, що зазнає вогневого впливу, м;  
 $A_r$  - площа залишкового поперечного перерізу, м<sup>2</sup>.

Для незахищених та захищених елементів у момент часу  $t = 0$  коефіцієнт зміни під час пожежі приймають  $k_{mod,fi} = 1$ . Для незахищених елементів за умови, що  $0 \leq t \leq 20$  хв, коефіцієнт зміни визначається за лінійною інтерполяцією.

### 1.3. Визначення глибини обвуглювання

Розрахункова глибина обвуглювання (рис. 2) розраховується за формулою:



**Рис.2.** Глибина одновимірного обвуглювання  $d_{char,0}$  та умовна глибина обвуглювання  $d_{char,n}$   
**Fig.2.** The depth of one-dimensional charring  $d_{char,0}$  and conditional charring depth  $d_{char,n}$ .

$$d_{char,0} = \beta_0 t, \quad (13)$$

де  $d_{char,0}$  - розрахункова глибина обвуглювання при одновимірному обвуглюванні;

$\beta_0$  - розрахункова швидкість одновимірного обвуглювання за стандартного температурного режиму, приймається за табл. 3 згідно [15];  
 $t$  - тривалість вогневого впливу.

Умовна розрахункова глибина обвуглювання (рис. 2) розраховується за формулою:

$$d_{char,n} = \beta_n t, \quad (14)$$

де  $d_{char,n}$  - умовна розрахункова глибина обвуглювання при одновимірному обвуглюванні, що враховує вплив заокруглених граней та тріщин;

$\beta_n$  - умовна розрахункова швидкість одновимірного обвуглювання за стандартного температурного режиму, що враховує вплив заокруглених граней та тріщин, приймається за табл. 3 згідно вимог [15];  
 $t$  - тривалість вогневого впливу.

При розрахунках вогнестійкості слід приймати розрахункову швидкість однорізного обвуглювання при умові мінімальної ширини поперечного перерізу:

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

Якщо мінімальної ширини поперечного перерізу менше за  $b_{\min}$  то в розрахунках слід приймати умовну розрахункову глибину обвуглювання.

**Табл. 3.** Розрахункові швидкості обвуглювання  $\beta_0$  та  $\beta_n$  для деревини, фанерованих матеріалів (LVL), дерев'яної обшивки та деревинних панелей.

**Table 3.** Estimated charring rates  $\beta_0$  and  $\beta_n$  for timber and LVL, timber cladding and timber panels.

Матеріали	$\beta_0$ , мм/хв	$\beta_n$ , мм/хв
<b>М'які сорти дерева і бук</b> Клеєна деревина з характеристичною густиною $\geq 290$ кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,7
Цільна деревина з характеристичною густиною $\geq 290$ кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,8
<b>Тверді сорти дерева</b> Цільна деревина або клеєна деревина з характеристичною густиною 290 кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,7
Цільна деревина або клеєна деревина з характеристичною густиною $\geq 450$ кг/м <sup>3</sup>	0,50	0,55
<b>Фанеровані матеріали (LVL)</b> Матеріали з характеристичною густиною $\geq 480$ кг/м <sup>3</sup>	0,65	0,7
<b>Панелі</b> Дерев'яна обшивка	0,9*	
Фанера	1,0*	-
Деревинні панелі, окрім фанери	0,9*	-

Розрахункові швидкості обвуглювання твердих сортів деревини, окрім бука, з густиною від 290 кг/м<sup>3</sup> до 450 кг/м<sup>3</sup> отримують шляхом лінійної інтерполяції значень табл. 3. Швидкість обвуглювання бука приймається як для щільного м'якого сорту деревини.

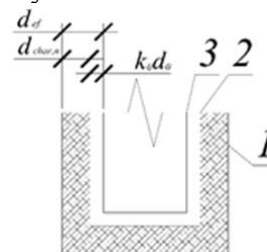
Робочий поперечний переріз визначають завдяки зменшенню початкового поперечного перерізу на робочу глибину обвуглювання  $d_{ef}$  за формулою:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0, \quad (16)$$

де  $d_0 = 7$  мм;  $d_{char,n}$  - умовна розрахункова глибина обвуглювання визначена за формулою (14);  $k_0$  - коефіцієнт, який приймають за табл. 4.

Примітка. Допускається, що матеріал біля лінії обвуглювання елемента в шарі за товшки  $k_0 d_0$  має міцність та жорсткість, що

дорівнюють нулю, тоді як характеристики міцності та жорсткості залишкового поперечного перерізу залишаються незмінними.



**Рис. 3.** Визначення залишкового і робочого поперечного перерізу.

1 – контур початкового перерізу; 2 – межа залишкового поперечного перерізу; 3 – межа робочого поперечного перерізу.

**Fig. 3.** Determination of residual and working cross-section. 1 – contour of the initial section; 2 – limit of residual cross-section; 3 – the limit of the working cross-section.

**Табл. 4.** Визначення коефіцієнта  $k_0$  для незахищених поверхонь.

**Table 4.** Determination of the coefficient  $k_0$  for unprotected surfaces.

Час, хв	$k_0$
$t < 20$	$t/20$
$t \geq 20$	1,0

Розрахункові характеристики міцності та жорсткості робочого поперечного перерізу приймають із коефіцієнтом  $k_{mod,fi} = 1,0$ .

Наведені правила стосуються прямокутних поперечних перерізів із м'яких сортів дерева, що зазнають трьох- або чотирьохбічного вогневого впливу, та круглого поперечного перерізу, що зазнає вогневого впливу по периметру.

2. Чисельні дослідження напружено-деформованого стану центрально стиснутої колони з урахуванням вогнестійкості.

За наведеною вище методикою перевіримо міцність центрально стиснутого дерев'яного елемента за потреби досягнення вогнестійкості  $t = 120$  хв. Зусилля від характеристикних: постійного  $N_{t,0,k} = 150$  кН та тимчасового (середньої тривалості) навантаження  $N_{t,0,k} = 100$  кН. Зусилля від граничних розрахункових: постійного  $N_{t,0,k} = 165$  кН та тимчасового (середньої тривалості) навантаження  $N_{t,0,k} = 120$  кН.

Розв'язування:

за формулами (1), (2) слід визначити значення постійного та тимчасового навантаження під час пожежі. Перед цим визначаємо коефіцієнти пониження, що визначає рівень навантаження під час пожежі за формулами (3) – (5):

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} = \frac{150 + 0,7 \cdot 100}{1,35 \cdot 150 + 1,5 \cdot 100} = 0,624$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}} = \frac{150 + 0,7 \cdot 100}{1,35 \cdot 150 + 1,5 \cdot 0,7 \cdot 100} = 0,715$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} = \frac{150 + 0,7 \cdot 100}{0,85 \cdot 1,35 \cdot 150 + 1,5 \cdot 100} = 0,683$$

де прийнято

$\gamma_G = 1,35$  – для несприятливого постійного навантаження;

$\gamma_{Q,1} = 1,5$  – для супутніх тимчасових навантажень; та

$\psi_{fi} = 0,7$  – для категорії А: житлові приміщення за табл. 1.

Таким часом розрахункові значення навантаження під час пожежі становитимуть:

- для постійного навантаження:

$$G_{d,fi} = \eta_{fi} G_d = 0,624 \cdot 165 = 102,96 \text{ кН,}$$

- для тимчасового навантаження (середньої тривалості):

$$Q_{d,fi} = \eta_{fi} Q_d = 0,624 \cdot 120 = 74,88 \text{ кН.}$$

Визначаємо умовну розрахункову глибину обвуглювання за формулою (14):

$$d_{char,n} = \beta_n t = 0,55 \cdot 120 = 66 \text{ мм,}$$

де  $\beta_n = 0,55$  мм/хв – умовна розрахункова швидкість одновимірного обвуглювання за стандартного температурного режиму, що враховує вплив заокруглених граней та тріщин, прийнята за табл. 3;

$t$  – тривалість вогневого впливу.

Визначаємо розрахункову глибину обвуглювання, що розраховується за формулою (13):

$$d_{char,0} = \beta_0 t = 0,50 \cdot 120 = 60 \text{ мм,}$$



де  $\beta_0 = 0.5$  мм/хв – розрахункова швидкість одновимірного обвуглювання за стандартного температурного режиму, приймається за табл. 3;

$t$  – тривалість вогневого впливу.

Для визначення швидкості одновимірного обвуглювання розраховуємо умовну мінімальну ширину поперечного перерізу за формулою (28) при  $d_{char,0} = 60$  мм > 13 мм:

$$b_{min} = 2d_{char,0} + 80 = 2 \cdot 60 + 80 = 200 \text{ мм.}$$

Таким чином ширина поперечного перерізу  $b = 300$  мм >  $b_{min} = 200$  мм. В подальших розрахунках приймаємо розрахункову глибину обвуглювання  $d_{char,0}$ .

Приймаємо робочу глибину обвуглювання за формулою (16):

$$d_{ef} = d_{char,0} + k_0 d_0 = 60 + 1 \cdot 7 = 67 \text{ мм,}$$

де  $d_0 = 7$  мм;

$k_0 = 1$  - коефіцієнт, прийнятий за табл. 4.

Приймаємо розміри робочого поперечного перерізу з урахуванням розрахункової глибини обвуглювання при умові чотирихбічного впливу вогню:

$$b = 300 - 67 \cdot 2 = 166 \text{ мм;}$$

$$h = 400 - 67 \cdot 2 = 266 \text{ мм.}$$

Таким чином робоча площа залишкового поперечного перерізу становить:

$$A_r = b \cdot h = 16,6 \cdot 26,6 = 441,56 \text{ см}^2.$$

Визначаємо розрахункове значення міцності під час пожежі за формулою (6):

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 0,998 \cdot \frac{18,75}{1} = 18,72 \text{ МПа}$$

де  $f_{20}$  – 20% -й квантиль розрахункового значення міцності за нормальної температури, визначений за формулою (8);

$k_{mod,fi}$  – коефіцієнт зміни під час пожежі, який для  $t > 20$  хв визначено за формулою (11);

$\gamma_{M,fi} = 1$  – значення коефіцієнта надійності за матеріалом, для цільної та клеєної деревини під час пожежі

20%-й квантиль розрахункового значення міцності за нормальної температури:

$$f_{20} = k_{fi} f_k = 1,25 \cdot 15 = 18,75 \text{ МПа,}$$

де  $k_{fi} = 1,25$  – значення коефіцієнту для суцільної деревини, що береться згідно табл. 2;

$f_{t,0,k} = 15$  МПа – характеристичне значення міцності деревини класу міцності С24.

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r} = 1,0 - \frac{1}{125} \cdot \frac{(16,6 + 26,6) \cdot 2}{16,6 \cdot 26,6} = 0,998$$

де  $p$  - периметр залишкового поперечного перерізу, що зазнає вогневого впливу;

$A_r$  - площа залишкового поперечного перерізу.

Визначимо розрахункові напруження при стиску вздовж волокон:

від постійного навантаження:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{G_{d,fi}}{A_r} = \frac{102,96}{441,56} = 0,23 \text{ кН/см}^2 = 2,3 \text{ МПа,}$$

від тимчасового навантаження:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{Q_{d,fi}}{A_r} = \frac{74,88}{441,56} = 0,17 \text{ кН/см}^2 = 1,7 \text{ МПа,}$$

Перевіряємо міцність центрально стиснутого елемента:

$$\frac{2,3}{18,72} + \frac{1,7}{18,72} = 0,21 < 1.$$

Перевірка виконується. Міцність елемента при центральному стиску за умови заданої вогнестійкості забезпечена.

Гнучкість стійки відносно осі у з умов залишкового розрахункового перерізу буде дорівнювати

$$\lambda_y = \frac{l_{y,d}}{i_y} = \frac{450}{4,8} = 93,75$$

де:  $l_{y,d} = \beta_y \cdot l = 1 \cdot 450 = 450$  см - розрахункова довжина елемента при шарнірному защемленні кінців;

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 0,289 \cdot b = 0,289 \cdot 166 = 48,0 \text{ мм}$$

- радіус інерції перерізу відносно осі у.

Гнучкість стійки відносно осі z з умов залишкового розрахункового перерізу буде дорівнювати:  $\lambda_z = \frac{l_{z,d}}{i_z} = \frac{450}{7,69} = 59$ ,

де:  $l_{z,d} = \beta_z \cdot l = 1 \cdot 450 = 450$  см - розрахункова довжина елемента при шарнірному защемленні кінців;

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 0,289 \cdot h = 0,289 \cdot 266 = 76,9 \text{ мм}$$

- радіус інерції перерізу відносно осі z.

Подальші розрахунки можна вести тільки відносно осі з більшим значенням гнучкості.

Відносна гнучкість стійки відносно осі у:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{94}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{23}{7400}} = 1,7,$$

де:  $f_{c,0,k} = 23$  МПа – характеристичне значення міцності деревини класу міцності С24 при стиску вздовж волокон;  $E_{0,05} = 7400$  МПа – 5%-й квантиль модуля пружності деревини вздовж волокон.

$$k_y = 0,5 \cdot [1 + 0,1 \cdot (1,7 - 0,3) + 1,7^2] = 2,02,$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{2,02 + \sqrt{2,02^2 - 1,7^2}} = 0,32.$$

Перевіряємо стійкість:

$$\frac{2,3}{0,32 \cdot 18,72} + \frac{1,7}{0,32 \cdot 18,72} = 0,67 < 1.$$

Перевірка виконується. Стійкість елемента з урахуванням залишкового перерізу під час пожежі забезпечена. Відповідно вогнестійкість елемента 120 хв забезпечена.

### 3. Результати дослідження

За результатами наведеного чисельного прикладу можна стверджувати, що досяг-

нення в колоні з клеєної деревини вогнестійкості 120 хв є цілком реальним навіть за рахунок лише збільшення поперечного перерізу елемента. При цьому межа вогнестійкості 120 хвилин центрально стиснутою стійкою досягається збільшенням її перерізу орієнтовно на 25%.

Проведені чисельні дослідження інших конструктивних елементів, таких як стіни з панелей із поперечно-клеєної деревини, балки з клеєної деревини тощо, підтверджують факт збільшення поперечного перерізу при забезпеченні обох граничних станів на величину до 25% при самих найгірших випадках вогневого впливу.

Враховуючи конструктивні особливості, і той факт, що наведено розрахунок чотириохвісного впливу вогню (що є винятковим випадком), таке збільшення не є критичним і знаходиться в межах величин коефіцієнтів надійності.

Подібні розрахунки можна виконувати з застосуванням моделювання в сучасних програмних комплексах які використовують метод скінчених елементів [18, 19] з використанням для панелей із поперечно-клеєної деревини методики наведеної в [20] з моделюванням панелей ортотропними пластинчастими СЕ №41 з використанням приведених модулів пружності, в тому числі і під час пожежі, та коригуванням коефіцієнтів Пуассона таким чином щоб зберігалась умова існування в деревини пружного потенціалу.

### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Доведено аналітичним шляхом, за методикою наведеною в ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157 [15], досягнення в вертикальних несучих конструкціях з цільної та клеєної деревини вогнестійкості 120 хв, а відповідно можливість зведення будівель III, II та I ступеня вогнестійкості, що передбачає будівництво більше 5 поверхів.

Для можливості зведення висотних будівель (5 поверхів і вище) з конструкцій із цільної, клеєної та поперечно-клеєної деревини слід забезпечити ступень їх вогнестійкості I, II та III. Для цього, окрім класу вогнестійкості конструкцій необхідно забезпечити групу конструкційного матеріалу за межею поширення вогню. Це питання вирішується лише шляхом проведення випробувань згідно вимог додатку Д [14].

Також проблеми вогнестійкості конструкцій з цільної, клеєної та поперечно-клеєної деревини вирішуються шляхом обробки антипіренами, фарбуванням спеціальними покриттями (як це прийнято робити з металевими конструкціями) та облицюванням іншими негорючими матеріалами.

Окремо слід розробити нормативний документ для зведення будівель і споруд умовною висотою більше 26,5 м з конкретними рекомендаціями щодо архітектурних, конструктивних особливостей, вимог пожежної безпеки тощо. Так, наприклад, в житлових будинках, можна зобов'язати, шляхи евакуації і місця загального користування обов'язково обладнувати системами пожежної сигналізації та автоматичного пожежогашіння.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Михайловський Д.В. Застосування деревини та деревинних матеріалів у будівництві. // *Международный информационно-технический журнал Оборудование и инструмент для профессионалов (деревообработка) - №4 / 199. - Харків, 2017. - С.40 - 44.*
2. Пермяков В. А., Клименко В. З. Состояние и перспективы применения строительных деревянных конструкций в Украине // *К. : АБУ, часопис Економіка будівництва. №4. 2005. С. 36-41.*
3. Михайловський Д.В. Світовий досвід і перспективи розвитку багатоповерхового будівництва з деревини. // *Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури Випуск 61, 2016; Одеса: ОДАБА, 2016. - 468 с. - С. 270 - 277.*
4. Flaig M., Blass H. J. Keilgezinkte Rahmenecken und Satteldachträger aus Brettsperrholz. // *Karlsruher Berichte zum Ingenieurbau 29, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2015, 180 p.*
5. Flatscher G., Bratulic K. and Schickhofer G., Screwed joints in cross-laminated timber structures // *13th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Quebec, Canada, 2014, P. 8.*
6. EN 1995-1-1:2008: Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, *European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium, 2008. 121 p.*
7. ДБН В.2.6-161:2017 Конструкції будівель і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – К.: *Мінрегіонбуд, 2017, 111 с.*
8. ÖNORM B 1995-1-1:2015 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – *Allgemeine Regeln für den Hochbau, (German) Austria, 2015, 140 p.*
9. DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – *Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, DIN, Berlin, 2010, 135p.*
10. Михайловський Д. В., Комар А. А. Перехресно клеєдощаті панелі та методи їх розрахунку // *Будівельні конструкції, теорія і практика №2 КНУБА, 2018. С. 146-153.*
11. Михайловський Д. В., Комар А. А. Аналіз існуючих методик розрахунку панелей з перехресно-клеєної деревини за другим граничним станом // *Будівельні конструкції, теорія і практика №5 КНУБА, 2019. С. 24 - 31.*
12. Mykhailovskyi Denys Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber / *Onir materialiv i teoriya sporud: nauk.-tex. zbirn. – K.: КНУБА, 2021. – Вип. 107. – С. 75-88.*
13. ДБН В.2.2-15:2019 Житлові будинки. Основні положення. – К.: *Мінрегіонбуд, 2019, 44 с.*
14. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – К.: *Мінрегіонбуд, 2017, 41 с.*
15. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157:2010 (EN 1995-1-2:2004) Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. - *Київ: Мінрегіонбуд України. 2010 – 65 с.*
16. EN 1995-1-2:2016: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design. – Part 1-2: General – Common rules and rules for buildings, *European Committee for*

- Standardization CEN, Bruxelles, Belgium, 2016. 82 p.*
17. **ДСТУ-Н Б EN 1990:2008 Єврокод.** Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). - Київ: *Мінрегіонбуд України*. 2009 – 101 с.
  18. **Городецкий Д. А., Барабаш М.С. и др.** Программный комплекс ЛИРА-САПР 2013. Учебное пособие // К. – М.: *Электронное издание, 2013. – 376 с.*
  19. **Городецкий А. С., Евзеров И. Д.** Компьютерные модели конструкций // *Киев, 2007. – 357 с.*
  20. **Mykhailovskyi Denys** Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber / *Strength of Materials and Theory of Structures. – Kyiv: KNUBA, 2021. – Issue 107. – P. 75 -88.*
  21. **Фесенко О., Колякова В., Дмитренко С., Маматюк Д.** (2022). Розрахунок на вогнестійкість дерев'яних згинальних конструкцій за методикою Єврокоду 5. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (10), 94–107.  
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.94-107>
  6. **EN1995-1-1:2008: Eurocode 5:** Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium, 2008. 121 p.
  7. **DBN V.2.6-161:2017** Konstruktsii budivel i sporud. Dereviani konstruktsii. Osnovni polozhennia. – K.: *Minrehionbud, 2017, 111 p.*
  8. **ÖNORM B 1995-1-1:2015 Eurocode 5:** Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln für den Hochbau, (German) Austria, 2015, 140 p.
  9. **DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12,** Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, DIN, Berlin, 2010, 135p.
  10. **Mykhaylovs'kyi D. V., Komar A. A.** Perekhresno kleyedoshchati paneli ta metody yikh rozrakhunku // *Budivel'ni konstruktsiyi, teoriya i praktyka №2 KNUBA, 2018. P. 146-153.*
  11. **Mykhaylovs'kyi D. V., Komar A. A.** Analiz isnuvuchykh metodyk rozrakhunku paneley z perekhresno-kleyenoyi derevyny za druhym hranychnym stanom // *Budivel'ni konstruktsiyi, teoriya i praktyka №5 KNUBA, 2019. P. 24 – 31.*
  12. **Mykhailovskyi Denys** Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber / *Opir materials and spore theory: sci.-tech. sbirn. – K.: KNUBA, 2021. - VIP. 107. - P. 75-88.*
  13. **DBN V.2.2-15:2019** Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia. – K.: *Minrehionbud, 2019, 44 p.*
  14. **DBN V.1.1-7:2016** Fire safety of everyday objects. Zagalni vimogi. – K.: *Minregionbud, 2017, 41 p.*
  15. **DSTU-N-P B V.2.6-157:2010 (EN 1995-1-2:2004)** Proektuvannia derevianykh konstruktsii. *Chastyina 1-2. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist. – Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. 2010 – 65 p.*
  16. **EN 1995-1-2:2016: Eurocode 5:** Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design. – Part 1-2: General – Common rules and rules for buildings, European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium, 2016. 82 p.
  17. **DSTU-N B EN 1990:2008 Yevrokod.** Osnovy proektuvannia konstruktsii (EN 1990:2002, IDT). - Kyiv: *Minrehionbud Ukrainy. 2009 – 101 p.*
  18. **Gorodetskiy D. A., Barabash M. S. i dr.**

## REFERENCES

1. **Mikhaylovs'kiy D.V.** Zastosuvannya derevini ta derevinnikh materialiv u budivnitstvi. // *Mezhdunarodnyy informatsionno-tehnicheskii zhurnal Oborudovaniye i instrument dlya professionalov (derevoobrabotka) - №4 / 199. Kharkiv, 2017. P.40 - 44.*
2. **Permiakov V. A., Klymenko V. Z.** Sostoianye y perspektiv pryimeneniya stroytelnykh dereviannykh konstruktsiyi v Ukrainy // K. : *ABU, chasopys Ekonomika budivnytstva. №4. 2005. P. 36 41.*
3. **Mykhailovskyi D.V.** Svitovyi dosvid i perspektivu rozvytku bahatopoverkhovoho budivnytstva z derevyny. // *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury Vypusk 61, 2016; Odesa: ODABA, 2016. - 468 s. - P. 270 - 277.*
4. **Flaig M., Blass H. J.** Keilgezinkte Rahmenecken und Satt eldachträger aus Brett sperrholz. *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau 29, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2015, 180 p.*
5. **Flatscher G., Bratulic K. and Schickhofer G.** Screwed joints in cross-laminated timber structures // *13th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Quebec, Canada, 2014, P. 8.*

Programmnyy kompleks LIRA-SAPR 2013. // Uchebnoye posobiye K. – M.: *Elektronnoye izdaniye*, 2013. – 376 p.

19. **Gorodetskiy A.S., Yevzerov I. D.** Komp'yuternyye modeli konstruktsiy // *Kiyev*, 2007. – 357 p.
20. **Mykhailovskiy Denys** Method of calculation of panel buildings from cross-laminated timber // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – Kyiv: *KNUBA*, 2021. – Issue 107. – P. 75 -88.
21. **Fesenko O., Koliakova V., Dmytrenko Ye., Mamatiuk D.** (2022). Rozrakhunok na vohnestiikist derevianykh zghynalnykh konstruktsii za metodykoiu Yevrokodu 5. *Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka*, (10), 94–107.  
<https://doi.org/10.32347/2522-182.10.2022.94-107>

## FIRE RESISTANCE OF HIGH-RISE BUILDINGS MADE OF TIMBER

*Denis MYKHAYLOVSKYI,  
Tetiana SKLIAROVA*

**Summary.** Building constructions from timber or cross-laminated timber become more and more widespread. The experience of designing, building, and exploitation of such buildings of various heights around the world confirms the expediency of their use. Recently, the construction of frame and panel multi-story buildings from laminated and cross-laminated timber has become especially widespread. In Ukraine, there is still an outdated opinion about the impossibility of high-rise buildings construction with load-bearing structures made of timber. This article analyzes the current regulatory framework from the point of view of limitations and prospects for their solution regarding such construction and design. A solution to the problem of calcu-

lation of high-rise buildings made of laminated timber and panel buildings made of cross-laminated timber is proposed, taking into account the minimum required fire resistance of the main supporting structures. The algorithm for calculating the load-bearing structures of high-rise buildings with a frame made of laminated and panels made of cross-laminated timber using the method of finite elements and analytical calculation is presented. The expediency and possibility of designing and constructing frame and panel high-rise buildings made from laminated and cross-laminated timber is substantiated.

However, in Ukraine, the construction of multi-story buildings using glued and cross-glued wood faces a large number of bureaucratic restrictions associated with the lack of modern experience in such construction and a clearly formed regulatory framework.

This article analyzes the current regulatory framework from the point of view of limitations and prospects for their solution regarding such construction and design. A solution to the problem of calculation of high-rise buildings made of glued wood and panel buildings made of transversely glued wood is proposed, taking into account the minimum required fire resistance of the main supporting structures. The algorithm for calculating the load-bearing structures of high-rise buildings with a frame made of glued wood and panel made of cross-glued wood using the finite element method and analytical calculation is presented. The expediency and possibility of designing and erecting frame and panel high-rise buildings from glued and cross-glued wood is substantiated.

**Keywords.** High-rise buildings; laminated timber; cross-laminated timber; panel building; structural fire resistance; calculation scheme; finite element method; stress-strain state; soil base-foundation-above-ground structure system.

*Стаття надійшла до редакції 10.08.23*