

Моделювання процесу горіння деревини методом кінцевих елементів

Богдан Демчина¹, Андрій Пелех², Роман Козак³, Михайло Сурмай.⁴

^{1,2,3,4}Національний університет «Львівська Політехніка»
вул. Карпінського, 6, Львів, Україна, 79013

¹bogdan195809@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3498-1519>

²andriypele@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-0390-0915>

³roman.p.kozak@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0001-9617-5128>

⁴mychajlo_surmaj@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-5381-6500>

DOI: 10.32347/2522-4182.6.2020.47-54

Анотація. Поняття лабораторних або натурних досліджень все частіше замінюється комп'ютерними симуляціями. Уже буденним для кожного інженера є моделювання статичної та динамічної роботи конструкції методом скінченних елементів. Інше питання постає при моделюванні аварійних впливів, таких як пожежа. Якщо для матеріалів, які мають здатність тривалий час зберігати свої геометричні характеристики, рішення реалізоване, то для такого матеріалу як деревина, для якої під час пожежі характерне вигорання та змінна перерізу, реалізація симуляції такої розрахункової ситуації за допомогою методу скінченних елементів є досить складним завданням.

У даній статті представлено результати моделювання та розрахунку завантаженої дерев'яної колони методом скінченних елементів, а також теоретичні розрахунки колони при односторонньому локальному пошкодженні перерізу внаслідок пожежі. Метою роботи є порівняти результати розрахунків теоретичним методом згідно із ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157:2010 з результатами, отриманими методом скінченних елементів. Розрахунок конструкції методом скінченних елементів реалізований у програмному комплексі «Ліра». Розрахунок виконано у плоскій постановці. Отримано результати розрахунку та сформувано висновки про доцільність використання методу скінчених елементів для розрахунку задач, для яких властиво зменшення перерізу конструкції в часі.

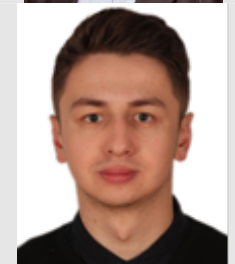
Ключові слова: деревина; високі температури; розрахункова модель; метод скінченних елементів



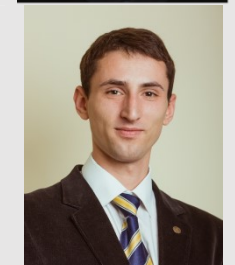
Богдан Демчина
д.т.н., професор кафедри
будівельних конструкцій і
мостів



Андрій Пелех
асистент кафедри
будівельних конструкцій та
мостів



Роман Козак
аспірант кафедри
будівельних конструкцій та
мостів



Михайло Сурмай
к.т.н., доцент кафедри
будівельних конструкцій та
мостів

ВСТУП

Одним із найважливіших критеріїв надійності споруд є забезпечення міцності

під час аварійних ситуацій, перш за все у випадку пожежі. Ризик обвалу під час пожежі напряму залежить від матеріалу споруди, так як для дерев'яних конструкцій характерне горіння і дерево може стати паливом для прогресуючої пожежі, тому важливим є проектування дерев'яних споруд із урахуванням цього фактору [1]. У той час коли для нового будівництва всебічно застосовують сучасні норми проектування із урахуванням необхідного пожежного опору, то для дерев'яних споруд минулого століття є чималий ризик виникнення аварійної ситуації. Як наслідок – чимало пожеж, які майже повністю знищили споруди історичної спадщини [2,3]. Таким чином аналіз дерев'яних споруд під час пожежі є актуальним як і для сучасного будівництва, так і для аналізу ризиків руйнування уже існуючих споруд.

У свою чергу моделювання та аналіз поведінки конструкцій, які зазнають впливів під час аварійних ситуацій, є популярною тематикою досліджень. Аналіз поведінки конструкції під час впливу високих температур дає можливість визначити проблемні місця в елементах при аварійних ситуаціях, для яких виконані розрахунки без зміни геометричних характеристик перерізу [4] та реалізувати розрахунки і моделювання з врахуванням пожежі на споруди, які зазнають впливу другого порядку [5].

Як уже було згадано вище, для дерев'яних конструкцій характерним є зміна геометричних характеристик перерізу під час дії температурних впливів, так званий піроліз. Під явищем піролізу, згідно з [6], розуміють частину незворотного хімічного розкладу, спричиненого винятково зростанням температури. Піроліз деревини супроводжується перетворенням її на деревне вугілля та газу і зниженням щільності матеріалу. Полум'яне горіння деревини під час піролізу зумовлене виходом з її поверхні достатньої кількості кисню та зростанням температури. Деревне вугілля під впливом газів, які вивільнились, горить тлінням, внаслідок чого відбувається його механічний розпад, його маса зменшується

або відбувається абляція зовнішнього шару вугілля.

Швидкість обвуглювання - це комплексний процес, який залежить від характеру взаємодії між піролізом деревини та генерацією тепла. Він є функцією багатьох чинників, таких як порода деревини, її щільність, вміст вологи, проникність та теплофізичні характеристики [7].

Межа розподілу між обвугленою та необвугленою деревиною має порівняно різкий температурний градієнт. Положення та розташування фронту обвуглювання звичайно оцінюють температурою межі поділу – 300 °С. Температуру основи деревного вугілля можна прийняти 288 °С [7].

Обвуглювання дерев'яних конструкцій було об'єктом інтенсивних досліджень упродовж багатьох років. В перших дослідженнях обвуглювання деревини описували втратою маси (г/с), пізніше швидкістю просування фронту обвуглювання від початкової поверхні (мм/с). Останнє визначення ширше застосовують, оскільки воно придатне для визначення робочого залишкового перерізу, який використовують для розрахунку дерев'яних конструкцій на вогнестійкість.

МЕТА ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є виконати розрахунок дерев'яної колони яка зазнає впливу високих температур під дією навантаження у часі методом скінченних елементів; проаналізувати та порівняти теоретичний розрахунок згідно із діючими нормами та результати отримані в наслідок розрахунку плоскої та об'ємної задачі методом скінченних елементів.

За основу теоретичного розрахунку було прийнято методіку розрахунку центрально-стиснутого перерізу згідно із [8,9]. В рекомендаціях прийнято два різних види розрахунку: 1) метод приведенного поперечного перерізу (п.4.2.2 [9]); 2) метод приведених характеристик (п.4.2.3 [9]). У даній публікації теоретичний розрахунок та моделювання роботи конструкції методом

скінченних елементів виконується згідно методу приведеного перерізу.

Для розрахунку була обрана дерев'яна колона перерізом 100x100мм, завдовжки 1000мм. Колона завантажена зосередженим навантаженням величиною 90 кН.

Ділянка, яка зазнає пошкодження знаходиться по середині висоти колони із розміром 10 см по висоті.

Матеріал був обраний такий, який відповідає деревині класу С30 (табл.Б.1 [8]) із наступними характеристиками:

- Густина: $\rho_k = 400 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- Модуль пружності вздовж волокон: $E_{0,mean}^{a,b} = 12000 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$.

Метод приведеного перерізу (п.4.2.2 [9]) ґрунтується на зменшенні початкового січення поперечного перерізу на робочу глибину обвуглювання d_{ef} (рис.1):

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (1)$$

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

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

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

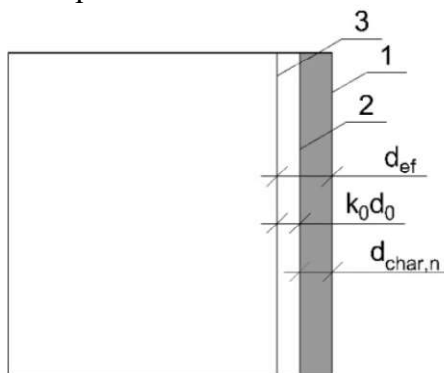


Рис.1. Визначення залишкового і робочого поперечного перерізу:

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

Fig.1. Definition of residual cross-section and effective cross-section:

1 – initial surface of member; 2 – border of residual cross-section; 3 – border of effective cross-section.

Коефіцієнт k_0 (рис.2) залежить від часу, який відповідає початку обвуглювання t_{ch} та наявності додаткового захисту поверхні деревини.

Умовна глибина обвуглювання $d_{char,n}$ визначається згідно із п.3.4.2 [9], та залежить від швидкості обвуглювання деревини.

Розрахунок виконуємо як для стиснутого перерізу згідно із розділом 9 [8], але із урахуванням постійної зміни поперечного перерізу, розрахункові характеристики при цьому приймають із коефіцієнтом $k_{mod,fi} = 1,0$ (п.4.2.2.5 [9]).

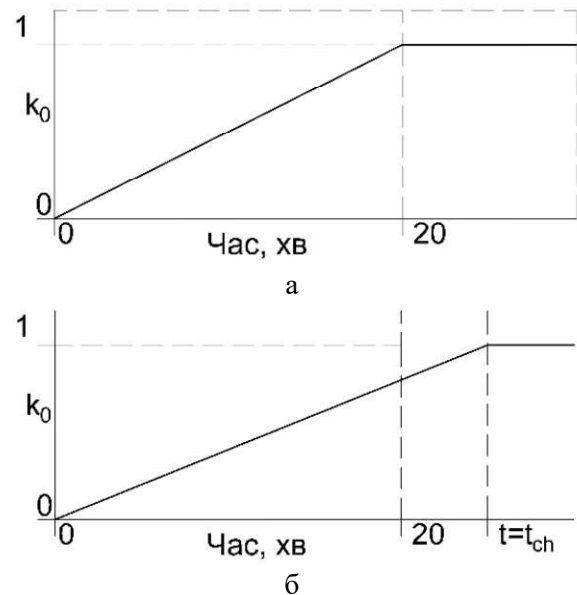


Рис.2. Залежність коефіцієнту k_0 із плином часу, для:

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

б) – для захищених елементів при $t_{ch} \geq 20$ хв.

Fig.2. Variation of k_0 :

а) – for unprotected members and protected members where $t_{ch} \leq 20$ min; б) – for protected members where $t_{ch} \geq 20$ min.

Розрахункове сумарне нормальне напруження, яке виникає в перерізі знаходимо із п.9.6.1 [8]:

при $\lambda_{rel,y} \leq 0,3$:

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

при $\lambda_{rel,y} > 0,3$:

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}} + \sigma_{m,y,d} \quad (3)$$

де

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{net}} \text{— розрахункове напруження}$$

стиску вздовж волокон;

$N_d = 90 \text{ кН}$ — розрахункове зусилля стиску вздовж волокон;

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

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

$M_{y,d} = N_d \cdot \frac{d_{ef}}{2}$ — розрахунковий момент, який виникає внаслідок ексцентриситету при послабленні перерізу;

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

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \text{— коефіцієнт повздо-}$$

вжнього згину;

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

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

$\beta_c = 0,2$ — безрозмірний коефіцієнт для цільної деревини;

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

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

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

$$l_{ef} = l \text{— розрахункова довжина колони;}$$

$$i \text{— радіус інерції перерізу.}$$

Для розрахунку конструкції методом скінченних елементів використано програмний комплекс «ЛІРА».

Розрахункова модель — пластинчата плоска конструкція із різним розміром кінцевих елементів (рис.3). Сітка кінцевих елементів у місці пошкодження перерізу згущена до розміру кінцевого елемента 0.025 м.

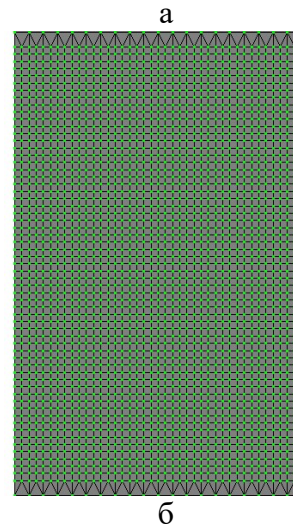
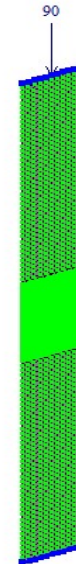


Рис.3. МСЕ модель колони:

а) загальний вид розрахункової схеми; б) фрагмент згущення сітки кінцевих елементів.

Fig.3. Column FEM model:

а) general view; б) finite mesh fragment.

Моделювання пошкодження перерізу деревини під час горіння використано інструмент «Монтаж (рис.4). Поетапно із моделі вилучалися кінцеві елементи відповідного розміру, тим самим змінюючи переріз колони.

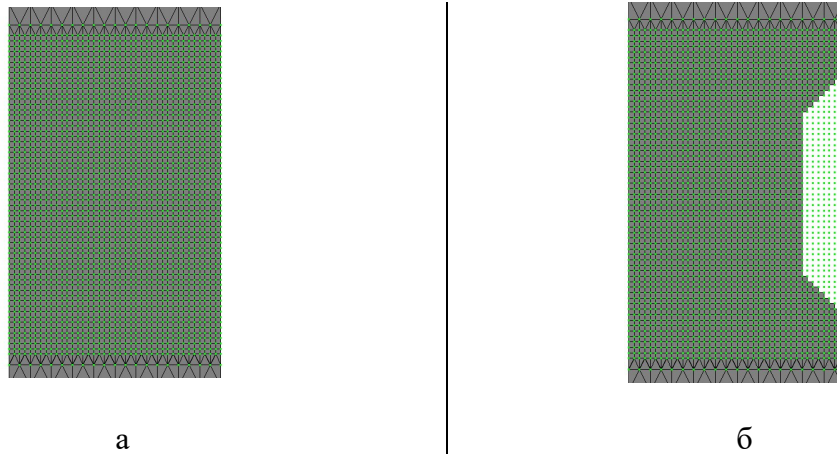


Рис.4. Вилучення скінченних елементів у інструменті «Монтаж»:

а елемент без пошкодження;
б моделювання пошкодження глибиною 2 см.

Fig.4. Removal of finite elements in the "Montazh" tool:

a element without damage;
b simulation of a 2 mm damage

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виконано розрахунок стиснутої дерев'яної колони методом приведенного перерізу та методом скінчених елементів.

За результатами теоретичних досліджень

сформована таблиця (табл.1) розрахунку напруження на кожному етапі послаблення перерізу, визначено час дії високої температури, та побудовано графіки залежності максимальних напружень в перерізі протягом часу дії високої температури (рис.5).

Табл.1. Результати розрахунку напружень колони під впливом пошкодження від дії високих температур методом приведенного перерізу.

Tabl.1. Results of calculation of stresses of a column under the influence of damage from high temperatures by the method of the effective cross-section.

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

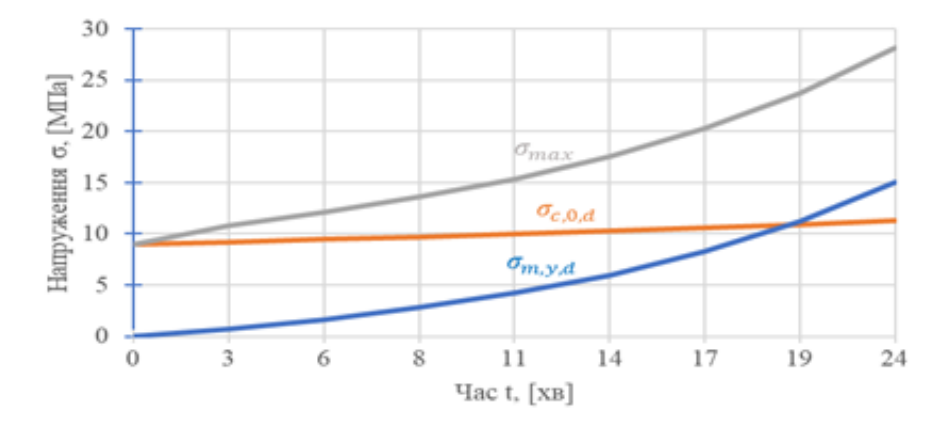


Рис.5. Графік залежності напружень σ обчислених методом приведенного перерізу від часу t .
Fig.5. Stress dependency diagram from time calculated by method of effective cross-section.

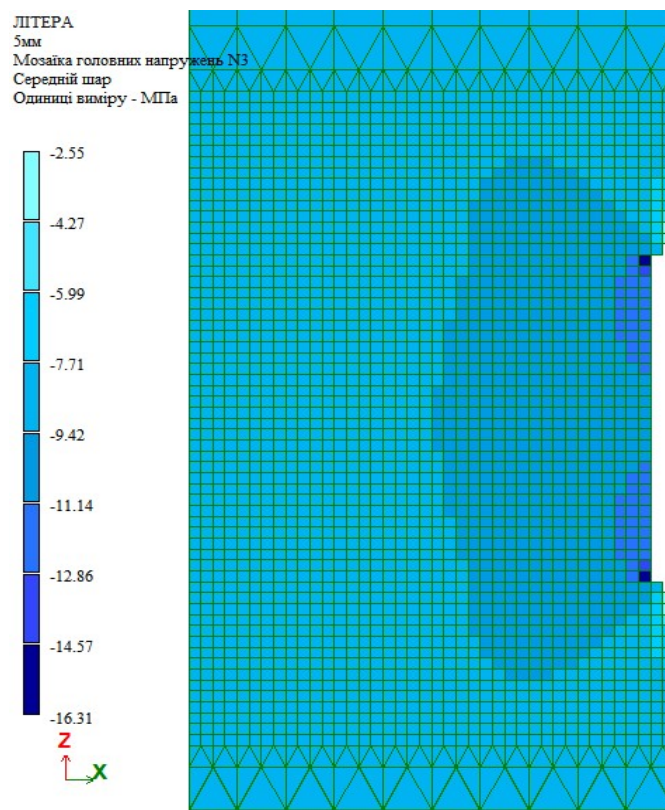


Рис.6. Ізополя головних напружень.
Fig.6. Maps of principal stresses.

Розрахунок методом скінчених елементів виконаний у ПК «Ліра» у лінійній постановці. Для аналізу та порівняння напружень використовуємо інструмент «Літера», тобто розрахунок головних напружень.

Як видно із рис.6. на краях локального пошкодження помітні концентратори напружень, тому розглядаємо два перерізи:

- переріз всередині пошкодження - σ_{mid}^{FEM} ,
- переріз в місці концентратора напружень

- σ_{ext}^{FEM} (враховуємо середнє значення в районі концентратора);
- Результати внесені у табл.2., виконано порівняння отриманих напружень методом скінчених елементів із напруженнями отриманими теоретичним шляхом. Побудовано графік залежності напружень від часу (рис.7).

Табл.2. Результати розрахунку напружень колони під впливом пошкодження від високих температур методом скінченних елементів.

Tabl.2. Results of calculation of stresses of a column under the influence of damage from high temperatures by the finite elements method.

d_{ef} [мм]	t [хв]	σ_{max} [МПа]	σ_{mid}^{FEM} [МПа]	Похибка[%]	σ_{ext}^{FEM} [МПа]	Похибка[%]
0,00	0,00	9,00	9	0,0	9	0,0
2,50	2,78	10,83	10,03	7,4	10,74	0,8
5,00	5,56	12,08	11,11	8,1	12,25	1,4
7,50	8,33	13,58	12,2	10,2	13,75	1,3
10,00	11,11	15,38	13,4	12,9	15,28	0,7
12,50	13,89	17,59	14,71	16,4	18	2,4
15,00	16,67	20,31	16,14	20,5	19,9	2,0
17,50	19,44	23,73	17,71	25,4	24,51	3,3
20,00	23,64	28,11	19,09	32,1	27,03	3,8

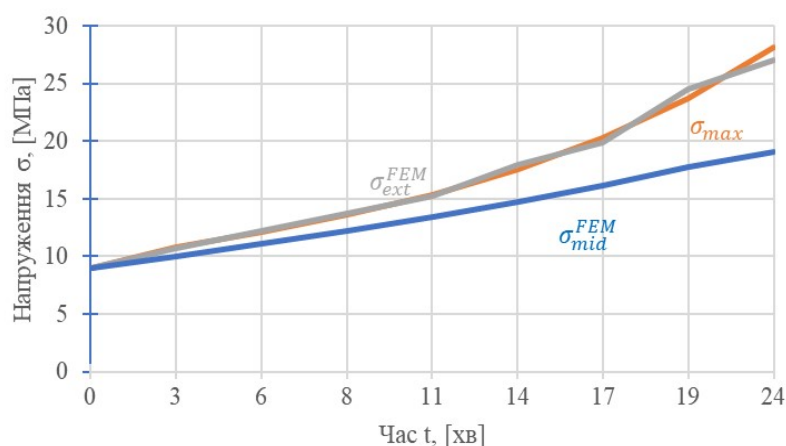


Рис.7. Графік залежності напружень σ обчислених методом скінченних елементів від часу t .

Fig.7. Stress dependency diagram from time calculated by the finite elements method

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Після порівняння результатів розрахунку, отриманих методом приведенного перерізу, та результатів розрахунку, отриманих методом скінчених елементів, можемо зробити наступні висновки:

- значення нормальних напружень у зоні концентраторів, отриманих методом скінченних елементів, відповідають значенням, отриманим за допомогою методу приведених перерізів.
модельовання локального пошкодження під впливом температури за допомогою

- методу скінченних елементів відповідає вимогам діючих норм.

Оскільки розрахунок аварійної ситуації методом скінчених елементів показав себе із позитивної сторони, буде продовжено його використання в симуляціях аварійних ситуацій для дерев'яних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Brandon D. et al. Engineering methods for structural fire design of wood buildings- structural integrity during a full natural fire BRANDFORSK 2018:2 PROJECT TECHNICAL PANEL. 2018. 40 p.
2. Heyman J. The Fire at Notre-Dame: Roof // Curr. Trends Civ. Struct. Eng. Iris Publishers LLC, 2019. Vol. 2, № 5.
3. Brown C. York Minster after the fire //

- Structural Survey. 1989. Vol. 7, № 3. P. 328–333.
4. Maraveas C., Swailes T., Wang Y. A detailed methodology for the finite element analysis of asymmetric slim floor beams in fire // *Steel Constr.* Wiley-Blackwell, 2012. Vol. 5, № 3. P. 191–198.
 5. Guo Q., Jeffers A.E. Finite-element reliability analysis of structures subjected to fire // *J. Struct. Eng. (United States)*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2015. Vol. 141, № 4.
 6. Шналь Т. Вогнестійкість та вогнезахист дерев'яних конструкцій: Навч. Посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка, 2006.
 7. Ройтман М. Противопожарное нормирование в строительстве. 2-е изд., Москва: Стройиздат, 1985. 590 p.
 8. ДБН В.2.6-161:2017 Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. P. 115.
 9. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157:2010 Конструкції будинків і споруд. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, MOD). Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. P. 65.

REFERENCES

1. Brandon D. et al. Engineering methods for structural fire design of wood buildings-structural integrity during a full natural fire BRANDFORSK 2018:2 PROJECT TECHNICAL PANEL. 2018. 40 p.
2. Heyman J. The Fire at Notre-Dame: Roof // *Curr. Trends Civ. Struct. Eng.* Iris Publishers LLC, 2019. Vol. 2, № 5.
3. Brown C. York Minster after the fire // *Structural Survey*. 1989. Vol. 7, № 3. P. 328–333.
4. Maraveas C., Swailes T., Wang Y. A detailed methodology for the finite element analysis of asymmetric slim floor beams in fire // *Steel Constr.* Wiley-Blackwell, 2012. Vol. 5, № 3. P. 191–198.
5. Guo Q., Jeffers A.E. Finite-element reliability analysis of structures subjected to fire // *J. Struct. Eng. (United States)*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2015. Vol. 141, № 4.
6. Shnal T. Vohnestiikist ta vohnezhakhyst derevianykh konstrukttsii: Navch. Posibnyk. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu

"Lvivska politekhnika, 2006.

7. Roitman M. Protyvopozharnoe normyrovanye v stroytelstve. 2nd-ed. Moskva: Stroiyzdat, 1985. 590 p.
8. ДБН В.2.6-161:2017 Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. P. 115.
9. ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157:2010 Конструкції будинків і споруд. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, MOD). Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. P. 65.

SIMULATION OF WOOD BURNING PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD

Bohdan Demchyna, Andrii Pelekh, Roman Kozak, Mykhailo Surmai

Abstract. The concept of laboratory or field research is increasingly being replaced by computer simulations. It is already common for every engineer to simulate the static and dynamic operation of a structure using the finite element method. Another question arises in the simulation of emergency effects such as fire. If for materials which possess ability to keep the geometrical characteristics for a long time the decision is realized, then for such material as wood for which during a fire burnout and variable section is characteristic, realization of simulation of such settlement situation by means of a method of final elements is a difficult enough task.

This article presents the results of modeling and calculation of the loaded wooden column by the finite element method, as well as theoretical calculations of the column in case of one-sided local damage of the section as a result of fire. The aim of the work is to compare the results of calculations by the theoretical method of DSTU-N-P B V.2.6-157: 2010 with the results obtained by the finite element method. Calculation of a design by a method of finite elements are realised in software complex "Lira". The calculation is done in a flat production. The results of calculation are obtained and conclusions about expediency of using the finite element method for calculation of tasks, for which reduction of construction cross-section in time is characteristic.

Keywords: wood; high temperatures; calculation model; finite element method.