

*В.Ю. Колосков, к.т.н., доцент, НУЦЗУ*

## **МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНОСТІ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ**

(представлено д-ром техн. наук Поздєєвим С.В.)

Побудована математична модель міцності елемента несучої конструкції при комплексному термічно-силовому навантаженні, що змінюється в часі. Розроблена імітаційна модель системи забезпечення безпеки при пожежі.

**Ключові слова:** міцність, термічно-силове навантаження, імітаційна модель, система забезпечення безпеки.

**Постановка проблеми.** Вогнестійкість будівельних конструкцій визначає, насамперед, величину проміжку часу, який можна використати для безпечної евакуації людей, що знаходяться у внутрішніх приміщеннях та поблизу. Згідно з ДБН В.1.1-7-2002 [1] експериментальним шляхом показники вогнестійкості визначаються за стандартного температурного режиму. Однак, в зоні ураження пожежі, яка виникає у межах замкнутого простору приміщень будівель, температурний режим може суттєво відрізнятись від стандартного, змінюючись у часі в залежності від багатьох факторів.

Актуальним у цьому зв'язку є використання методів імітаційного моделювання для визначення динаміки руйнівних процесів в елементах несучої конструкції будівлі з метою визначення умов навантаження, що запобігає руйнуванню, та розробки засобів, що дають можливість тривалий час зберігати несучу здатність конструкції в цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В державних стандартах України, впроваджених згідно з ДБН А.1.1-94:2010 [2] за програмою імплементації системи стандартів Єврокод та присвячених, зокрема, питанням розрахунків конструкцій на вогнестійкість, представлені математичні моделі залежності властивостей будівельних матеріалів від температури, що мають використовуватися при проектуванні будівель та споруд. Точність наведених моделей є цілком достатньою, однак вони визначені для температурних режимів, аналогічних стандартному, а отже не можуть бути застосовані при більш складних залежностях температури від часу без суттєвого уточнення.

У роботах багатьох авторів [3-8] представлені різні підходи до створення уточнених методів визначення вогнестійкості матеріалів несучих конструкцій, однак питанням аналізу міцності у динаміці сприйняття зовнішнього термічно-силового впливу приділяється недостатньо уваги. Наприклад, у [5] автором запропонований експериментально-розрахунковий метод, який є уточненим відносно методу, представленого у стандартах Єврокод, але він також не бере до уваги зміни навантаження на елемент конструкції під час самої пожежі.

Загальний підхід до створення моделей, що використовувався автором, викладено у роботі [9]. Що стосується застосування даного підходу для окремих випадків у вирішенні проблем забезпечення безпеки як загального плану, так і конкретних задач, ці результати викладено у роботах автора [10-12]. Саме підходи до дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій та вимоги до розрахункових методів її визначення викладені у ДБН В.1.1-7-2002 [1].

**Постановка завдання та його вирішення.** Під час пожежі при застосуванні засобів пожежогасіння у елементах несучої конструкції будівлі можливе виникнення складного напружено-деформованого стану, який визначається комбінацією наступних навантажень:

1) стискання у продольному напрямку внаслідок температурних деформацій, спричинених надходженням теплової енергії з епіцентру пожежі;

2) згинання у поперечному напрямку внаслідок навантаження на несучі конструкції, спричиненого вагою розташованих у приміщеннях об'єктів (меблі, обладнання, тощо) та додатковою вагою поданої у зону ураження вогнегасної суміші, яка розподіляється по поверхні перекриття.

Стискання несучих конструкцій у продольному напрямку визначається величиною температури нагріву самої конструкції  $T_k$ . Напруження  $\sigma^T$ , які при цьому виникають в ній, не залежать від площі її поперечного перерізу, та визначаються за формулою

$$\sigma^T = -\alpha_T E (T_k - T_{k0}), \quad (1)$$

де  $\alpha_T$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу;  $E$  – модуль пружності;  $T_{k0}$  – початкова температура конструкції. Відповідно, при відсутності інших навантажень у продольному напрямку умову руйнування елемента конструкції можна записати у вигляді

$$|\sigma^T| = \alpha_T E (T_k - T_{k0}) \leq [\sigma], \quad (2)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження стискання для матеріалу несучої конструкції.

За рахунок дії факторів пожежі у перекритті відбувається накопичення тепла, яке частково втрачається за рахунок теплообміну з середовищем інших приміщень, що примикають до перекриття зовні. Температура елемента несучої конструкції  $T_k$  є функцією

$$T_k = T_k(T_{C3Y}, T_3, K_{C3Y}, K_3), \quad (3)$$

де  $T_{C3Y}$  – температура середовища зони ураження (СЗУ);  $T_3$  – температура у примикаючому зовні приміщенні;  $K_3$ ,  $K_{C3Y}$  – значення узагальнених коефіцієнтів теплопередачі систем «перекриття-зовнішнє приміщення» та «перекриття-зона ураження» відповідно.

Значення температури  $T_3$  у зовнішньому приміщенні буде з часом

збільшуватися за рахунок теплопередачі від перекриття. У випадку, коли примикаючим простором є зовнішній простір навколишнього середовища (НС), можна прийняти  $T_s = T_{НС} = \text{const}$ .

Температура у зоні горіння є змінною величиною, яка від моменту займання суттєво збільшується. За стандартним температурним режимом (при необмеженій пожежі) залежність температури від часу визначається за формулою [13]

$$T_{СЗУ}(t) = 345 \lg(8t + 1) + 20, \quad (4)$$

де  $t$  – час, що пройшов з моменту займання, хвилини. Значення температури, визначені для різних величин часу за залежністю (4), представлені у таблиці 1.

**Табл. 1. Залежність температури від часу при необмеженій пожежі**

Час $t$ , хвилини	5	15	30	60
Температура $T$ , °C	576	738	841	945

При пожежі у обмежених приміщеннях теплообмін змінюється, температурний режим пожежі  $T_{СЗУ}(t)$  стає більш складним, однак величини температур, що досягаються при цьому, також є значними [7, 14].

Визначним для вирішення поставленої проблеми є факт наявності залежності міцнісних властивостей матеріалів несучих конструкцій від температури, що є також нелінійною та суттєво впливає на результати обчислення напружень у елементах несучих конструкцій перекриття будівель [15]. Наприклад, для сталей з підвищенням температури значення модулю пружності  $E$  неупинно знижується, значення лінійного коефіцієнту розширення  $\alpha_T$  збільшується, а значення гранично допустимого навантаження  $[\sigma]$  досягають локального максимуму при значеннях температури 250...300°C, після чого знижується, аж до майже повної втрати несучої здатності при температурі біля 600°C.

З урахуванням всього вищезазначеного, вираз для напружень (1) та умова руйнування несучої конструкції (2) при відсутності інших навантажень отримують наступний вигляд:

$$\sigma^T(T_k(t)) = -\alpha_T(T_k(t))E(T_k(t))(T_k(t) - T_{k0}); \quad (5)$$

$$|\sigma^T(T_k(t))| = \alpha_T(T_k(t))E(T_k(t))(T_k(t) - T_{k0}) \leq [\sigma](T_k(t)), \quad (6)$$

де  $[\sigma](T_k(t))$  – гранично допустиме значення дотичного напруження матеріалу елемента несучої конструкції в залежності від його температури. За рахунок навантаження на несучі конструкції, спричиненого вагою розташованих у приміщеннях об'єктів та самого перекриття, у елементах несучої конструкції виникають нормальні та дотичні напруження з максимальними значеннями  $\sigma_0$  та  $\tau_0$  відповідно, які можна вважати незмінними у процесі пожежі ( $\sigma_0 = \text{const}$  та  $\tau_0 = \text{const}$ ). Наявність темпе-

ратурних напружень збільшує значення нормальних напружень у зоні стискання поперечного перерізу елемента, та зменшує їх у зоні розтягання. З урахуванням цього умова (6) отримує наступний вигляд

$$\sigma_{\max}(t) = \sigma_0 + \alpha_T(T_k(t))E(T_k(t))(T_k(t) - T_{k0}) \leq [\sigma](T_k(t)). \quad (7)$$

Вважаємо, що до приміщення подається вогнегасільна суміш з масовою витратою  $m(t)$ . Частина суміші, поданої до приміщення, випаровується у повітря зони ураження з масовою витратою  $m_1(t)$ , змінюючи його газовий склад та прозорість та відповідним чином впливаючи на величину узагальненого коефіцієнта теплопередачі системи «перекриття-зона ураження»  $K_{CЗУ}(m_1(t))$ . Одночасно за рахунок випаровування відбувається охолодження перекриття на величину

$$\Delta T_k^{\text{охол}}(t) = - \left( \frac{M(t)c_{\text{суміш}}(T_{\text{суміш}}(t) - T_{\text{суміш}0})}{C_k} + \frac{M_1(t)c_{\text{суміш}}(T_{\text{суміш}_{\text{вип}}} - T_{\text{суміш}}(t)) + M_1(t)L_{\text{суміш}}}{C_k} \right), \quad (8)$$

де  $M(t) = \int m(t)dt$  – загальна маса поданої до зони ураження вогнегасільної суміші;  $M_1(t) = \int m_1(t)dt$  – загальна маса суміші, що випарилася;  $c_{\text{суміш}}$  – питома теплоємність суміші;  $L_{\text{суміш}}$  – питома теплота пароутворення суміші;  $T_{\text{суміш}_{\text{вип}}}$  – температура випаровування суміші;  $T_{\text{суміш}0}$  – початкова температура суміші;  $T_{\text{суміш}}(t)$  – температура суміші на поверхні перекриття, величина якої є функцією часу  $t$  (якщо випаровується весь обсяг поданої суміші,  $T_{\text{суміш}}(t) = T_{\text{суміш}_{\text{вип}}} = \text{const}$ );  $C_k$  – загальна теплоємність перекриття (несучої конструкції). Отже, температура елемента конструкції буде остаточно визначатися за формулою

$$T_k(t) = T_k(T_{CЗУ}, T_3, K_{CЗУ}, K_3, t) - \Delta T_k^{\text{охол}}(t). \quad (9)$$

Частина суміші  $M_2(t) = M(t) - M_1(t)$ , поданої до приміщення, залишається у вигляді рідини на поверхні перекриття, утворюючи додаткове навантаження на елементи несучої конструкції. У загальному випадку можна вважати, що розподіл суміші по поверхні перекриття рівномірний, тому максимальні можливі величини нормальних та дотичних напружень визначаються формулами

$$\sigma_{\max}(t) = \sigma_0 + \alpha_T(T_\varepsilon(t))E(T_\varepsilon(t))(T_\varepsilon(t) - T_{\varepsilon 0}) + \frac{M_2(t)g}{8N} \frac{l}{W_X}; \quad (10)$$

$$\tau_{\max}(t) = \tau_0 + \frac{M_2(t)g}{2N} \frac{S_X}{d \cdot I_X},$$

де  $N$  – кількість елементів несучої конструкції (балок);  $I_X$  – осьовий момент перерізу елемента відносно його нейтральної осі;  $W_X$  – момент опору перерізу елемента відносно його нейтральної осі;  $S_X$  – максимальне значення статичного моменту перерізу елемента відносно його нейтральної осі;  $l$  – довжина елемента;  $d$  – ширина перерізу у місці найбільшого навантаження дотичним напруженням. Умови міцності з урахуванням формул (10) визначаються виразами

$$\sigma_{\max}(t) \leq [\sigma](T_k(t)); \quad \tau_{\max}(t) \leq [\tau](T_k(t)), \quad (11)$$

де  $[\tau](T_k(t))$  – гранично допустиме значення дотичного напруження матеріалу елемента несучої конструкції в залежності від його температури. При сукупній дії визначених навантажень умови міцності елемента несучої конструкції для балки двотаврового перерізу на додаток до (11) слід доповнити також умовою

$$\sigma_{\text{екв}}(t) = \sqrt{\sigma_B^2 + 3 \cdot \tau_B^2} \leq [\sigma](T_k(t)), \quad (12)$$

де  $\sigma_B(t) \approx 0,9\sigma_{\max}(t)$ ,  $\tau_B(t) \approx 0,85\tau_{\max}(t)$ .

Очевидним є той факт, що процеси, які відбуваються у елементі несучої конструкції перекриття за описаних умов, є складними за динамікою розвитку у часі, тому доцільним вважається використання для їх опису та прогнозування методу математичного моделювання, зокрема імітаційних моделей.

Систему забезпечення безпеки при надзвичайній ситуації (СЗБ НС) можна розглядати за аналогією з системою життєзабезпечення виробництва [11] як буферну систему, завданням якої є управління функціональними станами організмів людей, що знаходяться у зоні ураження з урахуванням наявності адаптаційних механізмів.

Множина факторів СЗУ  $F_1 \in \Phi$ , які впливають на безпеку людей, що знаходяться у зоні ураження, сформована комбінацією значень факторів

$$F_1(t) = \sigma_{\max}(t), F_2(t) = \tau_{\max}(t), F_3(t) = \sigma_{\text{екв}}(t). \quad (13)$$

Вона є відображенням множини факторів НС  $\Phi_{\text{НС}}$

$$\varphi_F : \Phi_{\text{НС}} \rightarrow \Phi. \quad (14)$$

Функціональний стан організму людини описується множиною параметрів  $\varepsilon_j(t) \in E$ , що є відгуками на зміну багатьох факторів СЗУ, а отже визначена множиною є відображенням

$$\varphi_\varepsilon : \Phi \rightarrow E. \quad (15)$$

Оскільки руйнування несучої конструкції перекриття унеможли-

лює евакуацію людей, а отже веде до їх травмування та можливої загибелі, слід вважати залежність показників функціонального стану від факторів міцності стрибкоподібною з моментальним перевищенням допустимих значень при перевищенні максимально допустимих значень хоча б одного з факторів міцності  $F_1$ ,  $F_2$  чи  $F_3$ , та незмінністю показників функціонального стану у межах допустимого навантаження за визначеними факторами. Робота СЗБ НС виражається наступною формулою

$$E = \varphi_\varepsilon(\varphi_F(\Phi_{НС})). \quad (16)$$

Множину критеріїв оцінювання безпеки для визначених факторів СЗУ  $\chi_i \in K$  отримуємо за формою нормативного критерію визначення безпеки [12],

$$\chi_1 = \frac{\sigma_{\max}(t)}{[\sigma](T_k(t))} \leq 1; \quad (17)$$

$$\chi_2 = \frac{\tau_{\max}(t)}{[\tau](T_k(t))} \leq 1; \quad (18)$$

$$\chi_3 = \frac{\sigma_{\text{екв}}(t)}{[\sigma](T_k(t))} \leq 1. \quad (19)$$

Таким чином, на основі вище зазначеного пропонується визначати етапи задачі імітаційного моделювання в наступній послідовності.

Розглядається функціонування СЗБ НС на інтервалі часу  $(t_0, t_1)$ , що характеризується дією комплексу факторів  $\Phi$  (13), які викликають сумарний ефект у вигляді відгуків  $E$  (16).

Процес функціонування системи полягає в оцінюванні безпеки діючих факторів і відтворенні керуючого імпульсу  $Y$  на зміну діючих значень факторів. Формалізовано процес управління може бути подано у вигляді вирішення задачі оптимізації

$$E(F_1, F_2, F_3) \rightarrow \min; \quad (20)$$

$$\chi_i(F_1, F_2, F_3, t) \leq 1, \quad i = 1 \dots 3; \quad (21)$$

$$F_i \geq 0. \quad (22)$$

Результатом моделювання є залежності від часу

$$W(t) = K(t), Y(t) \quad (23)$$

критеріїв оцінювання безпеки  $K(t)$  (17)-(19) та керуючого імпульсу  $Y(t)$ , який реалізується за рахунок зміни величини масової витрати  $m(t)$  вогнегасної суміші, що подається до зони ураження

$$Y = \{m\}. \quad (24)$$

Задача знаходження результату моделювання формалізується таким чином:

$$W(t) = M(A(t), B(t)), \quad (25)$$

де  $A(t)$  – сукупність вхідних параметрів моделювання поведінки системи, яка складається з множини значень зовнішніх факторів  $\Phi$  та відгуків  $E$

$$A = \Phi \cup E. \quad (26)$$

$B$  – сукупність обмежень, що регламентують роботу СЗБ НС

$$B = \{[F]\} \cup \{[\varepsilon]\}. \quad (27)$$

Отже, процес функціонування СЗБ НС в загальному вигляді можна записати таким чином:

$$\{A, B\} \rightarrow W : \{K \rightarrow Y\}. \quad (28)$$

**Висновки.** Запропонована модель СЗБ НС може бути використана для прогнозування поведінки несучих конструкцій будівель та споруд під час пожеж, що виникають в них, а також при проектуванні систем та засобів, що використовуватимуться для їх ліквідації. Моделюючи залежності, визначені для міцності елементу несучої конструкції, відповідають вимогам, що висуваються до математичних моделей вогнестійкості конструкцій за ДБН В.1.1.7-2002 [1]. Для підвищення точності результатів моделювання необхідним є проведення досліджень у напрямку визначення залежностей інтенсивності випаровування вогнегасних сумішей, що використовуються, від температурного режиму у зоні ураження.

## ЛІТЕРАТУРА

1. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: Держбуд України, 2003. – 33 с.
2. ДБН А.1.1-94:2010. Проектування будівельних конструкцій за Єврокодами. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 22с.
3. Васильченко А.В. Оценка предела огнестойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных фиброматериалами / А.В. Васильченко, Н.Б. Золочевский, И.М. Хмыров // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 33. – Х.: НУГЗУ, 2013. – С. 27-32.
4. Гуліда Е.М. Вогнестійкість залізобетонних плит перекриття житлових та адміністративних будівель / Е.М. Гуліда, А.А. Ренкас // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 32. – Х.: НУГЗУ, 2012. – С. 62-73.
5. Поздеев С.В. Верификация результатов уточненного расчетного метода определения пределов огнестойкости железобетонных конструкций / С.В. Поздеев // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 29. – Х.: НУГЗУ, 2011. – С. 141-148.

6. Белов В.В. Огнестойкость железобетонных конструкций: модели и методы расчета / В.В. Белов, К.В. Семенов, И.А. Ренев // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 6. – С. 58-61.

7. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.

8. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.

9. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

10. Колосков В.Ю. Метод прогнозування адаптації оператора до дії шкідливих факторів машинобудівного виробництва: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / В.Ю. Колосков. – Х., 2007. – 178 с.

11. Колосков В.Ю. Имитационная модель системы жизнеобеспечения аэрокосмического производства / В.Ю. Колосков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. – Вып. 18. – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т, 2003. – С. 87-93.

12. Колосков В.Ю. Критерий оценки безопасности влияния производственных факторов на человека / В.Ю. Колосков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 46(3). – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т, 2006. – С. 71-77.

13. ДСТУ Б В.1.1-4-98. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. – К.: Держбуд України, 1999. – 19 с.

14. Поспелов Б.Б. Системный анализ моделей возникновения пожара в негерметичном помещении / Б.Б. Поспелов, Р.И. Шевченко, А.Н. Коленов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 34. – Х.: НУГЗУ, 2013. – С. 140-149.

15. Пушкаренко А.С. Будівельні матеріали та їх поведінка в умовах високих температур / А.С. Пушкаренко, О.В. Васильченко. – Х.: АПБУ, 2001. – 166 с.

В.Ю. Колосков

#### **Моделирование прочности несущих конструкций зданий во время пожара**

Построена математическая модель прочности элемента несущей конструкции при комплексном термо-силовом нагружении, переменном во времени. Разработана имитационная модель системы обеспечения безопасности при пожаре.

**Ключевые слова:** прочность, термо-силовое нагружение, имитационная модель, система обеспечения безопасности.

V.Yu. Koloskov

#### **Modelling of strength of carrying constructions of buildings during the fire**

The mathematical model of strength of carrying construction element under complex thermal and force loading is built. Imitation model of fire safety provision system is developed.

**Keywords:** strength, thermal and force loading, imitation model, safety provision system.