

В.Ю. Колосков, к.т.н., доцент, НУЦЗУ

МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНОСТІ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ЗА УМОВ ЛОКАЛІЗОВАНОЇ ПОЖЕЖІ

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

Побудована вдосконалена математична модель міцності елемента несучої конструкції при комплексному термічно-силовому навантаженні, що змінюється в часі. Визначено критерії оцінювання рівня безпеки при імітаційному моделюванні системи забезпечення безпеки при локалізованій пожежі.

Ключові слова: міцність, термічно-силове навантаження, імітаційна модель, критерії оцінювання, 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. Одним з граничних станів, що використовуються при визначенні меж вогнестійкості, є втрата конструкцією несучої здатності. Згідно з ДБН В.1.1-7-2002 [1] експериментальним шляхом показники вогнестійкості визначаються за стандартного температурного режиму. Оскільки температурний режим локалізованої пожежі є складним, результат його впливу, що виражається у перенавантаженні та наступному руйнуванні елементів конструкції, суттєво залежить від умов прогріву та змінюється 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 [10-13], зокрема у роботі [13] сформовано імітаційну модель системи управління безпекою під час пожежі, що є придатною для визначення меж вогнестійкості елементів конструкції за граничним станом втрати нею несучої здатності, однак сформовані в [13] критерії оцінювання рівня безпеки за міцністю можуть бути застосовані лише за умови рівномірного нагрівання елементів конструкції за довжиною.

Постановка завдання та його вирішення. Пальні речовини у приміщеннях розташовані, як правило, локалізовано, а отже при їх спалахуванні за рахунок прямого контактного теплообміну елементи несучої конструкції перекриття, розташовані безпосередньо під ними, матимуть температуру, значно вищу за середньооб'ємну у приміщенні. Більш того, концентроване нагрівання найбільш напруженої ділянки елемента, що супроводжується зменшенням меж міцності та текучості матеріалу, з якого він виготовлений, може призвести до його руйнування з подальшим перерозподілом навантаження на інші елементи конструкції, що може призвести до їх перенавантаження та подальшого ланцюгового руйнування. З урахуванням усього вищесказаного представлену роботу було присвячено вирішенню завдання вдосконалення критеріїв оцінювання рівня безпеки, викладених у роботі [13], з урахуванням умов нерівномірності розподілу температури в елементах несучої конструкції перекриття.

Під час пожежі за умови застосування засобів пожежогасіння у елементах несучої конструкції виникає складний напружено-деформований стан, який визначається комбінацією навантажень [13]:

1) стискання у продольному напрямку внаслідок температурних деформацій, спричинених надходженням теплової енергії від речовини, що горить безпосередньо, або через середовище зони горіння;

2) згинання у поперечному напрямку внаслідок навантаження від розташованих у приміщеннях об'єктів та залишків поданої до зони горіння вогнегасної суміші, які деяким чином розподіляються по поверхні перекриття.

Сумарні напруження, що виникають у елементі конструкції, можна визначити наступним чином:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_T + \sigma_M; \quad (4)$$

$$\tau = \tau_0 + \tau_M, \quad (5)$$

де σ_0 , τ_0 – значення відповідно нормальних та дотичних напружень, які виникають за рахунок навантаження, спричиненого вагою розташованих у приміщенні об'єктів та самого перекриття (вважатимемо, що під час пожежі $\sigma_0 = \text{const}$ та $\tau_0 = \text{const}$); σ_M , τ_M – значення нормальних та дотичних напружень, які виникають за рахунок навантаження, спричиненого вагою залишків вогнегасної суміші на поверхні перекриття; σ_T – значення нормального напруження, яке виникає внаслідок нагрівання елемента, що супроводжується його деформацією.

Оскільки температурний режим пожежі при застосуванні засобів пожежогасіння є складним та суттєво відрізняється від стандартного [14], а фізичні властивості матеріалів у випадку їх нагрівання змінюються, то умови міцності для балки перекриття у загальному вигляді виражаються наступним чином [13]:

$$\sigma_{\max}(t) \leq [\sigma](t); \quad (1)$$

$$\tau_{\max}(t) \leq [\tau](t), \quad (2)$$

та за необхідності доповнюються додатковою умовою

$$\sigma_{\text{екв}}(t) \leq [\sigma](t), \quad (3)$$

де $\sigma_{\max}(t)$, $\tau_{\max}(t)$, $\sigma_{\text{екв}}(t)$ – максимальні значення нормальних, дотичних та еквівалентних напружень, визначені для елемента конструкції; $[\sigma](t)$, $[\tau](t)$ – гранично допустимі значення нормального та дотичного напружень матеріалу елемента відповідно, визначені у деякий момент часу з урахуванням його температури.

У роботі [13] для випадку рівномірного нагрівання жорстко зашпеленої з обох боків балки перекриття та рівномірного ж розподілу залишків вогнегасної суміші на його поверхні отримано наступні залежності, що визначають величини нормальних та дотичних напружень в ній:

$$\sigma_{\max}(t) = \sigma_0 + \alpha_T (T_k(t)) E(T_k(t)) (T_k(t) - T_{k0}) + \frac{M_2(t)g}{8N} \frac{1}{W_X}; \quad (4)$$

$$\tau_{\max}(t) = \tau_0 + \frac{M_2(t)g}{2N} \frac{S_X}{d \cdot I_X}, \quad (5)$$

де $T_k(t)$ – значення температури балки у момент часу t від початку пожежі; T_{k0} – початкова температура балки; α_T – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу; E – модуль пружності матеріалу; $M_2(t)$ – частина суміші, поданої до приміщення, залишається у вигляді рідини на поверхні перекриття, утворюючи додаткове навантаження на

елементи несучої конструкції; 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.

У державному стандарті ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 [14] для основних конструкційних сталей запропоновані моделюючі залежності від температури безпосередньо відносної теплової деформації ε_T та модулю пружності (залежності для звичайної вуглецевої сталі, а також для нержавіючої сталі марки 08X18H10 див. рис. 1 та 2), а отже при їх застосуванні складова нормального напруження σ_T , що виникає у балці внаслідок її нагрівання за умов збереження пружності деформацій, визначатиметься за формулою

$$\sigma_T(t) = \varepsilon_T(T_k(t)) \cdot E(T_k(t)). \quad (6)$$

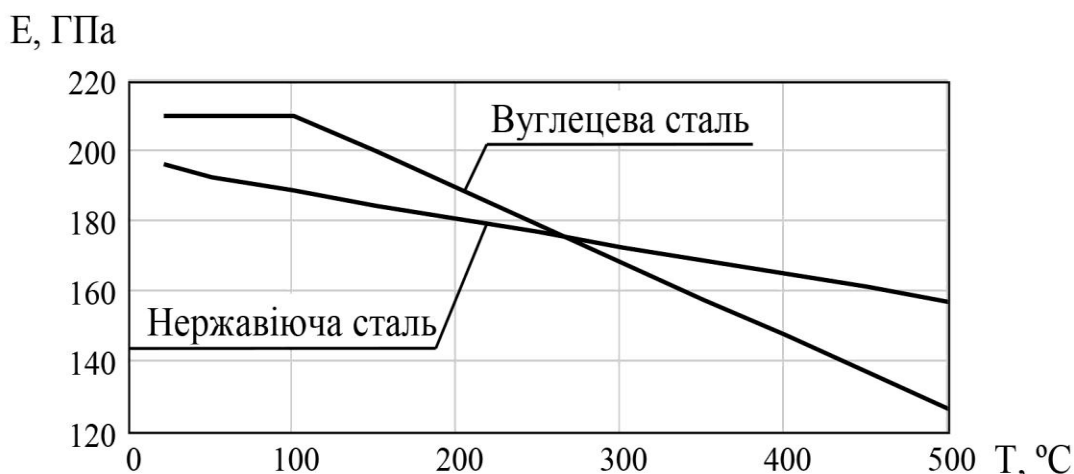


Рис. 1. Залежності від температури модулю пружності для вуглецевої та нержавіючої сталей згідно ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010

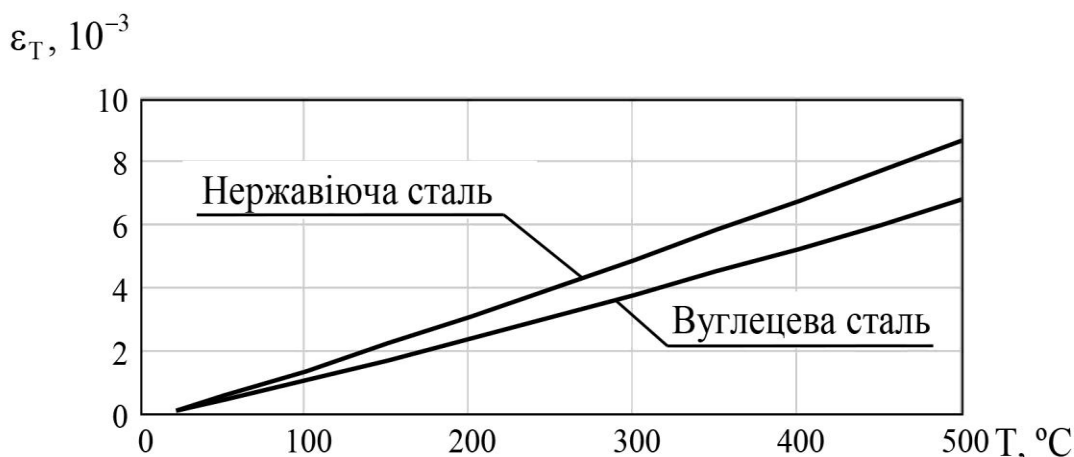


Рис. 2. Залежності від температури відносної теплової деформації для вуглецевої та нержавіючої сталей згідно ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010

Залежності значення σ_T для обраних раніше матеріалів представлені на рис. 3. Як можна бачити, за обраних умов балка досить швидко досягає граничних значень напружень, виходячи за межі зони пружних деформацій, що становить серйозну загрозу руйнування конструкції в цілому. Натомість використання засобів пожежогасіння, що контактують з поверхнею покриття, дозволяє за рахунок відбору теплової енергії шляхом теплообміну знизити температуру балки та підтримувати її на безпечному рівні.

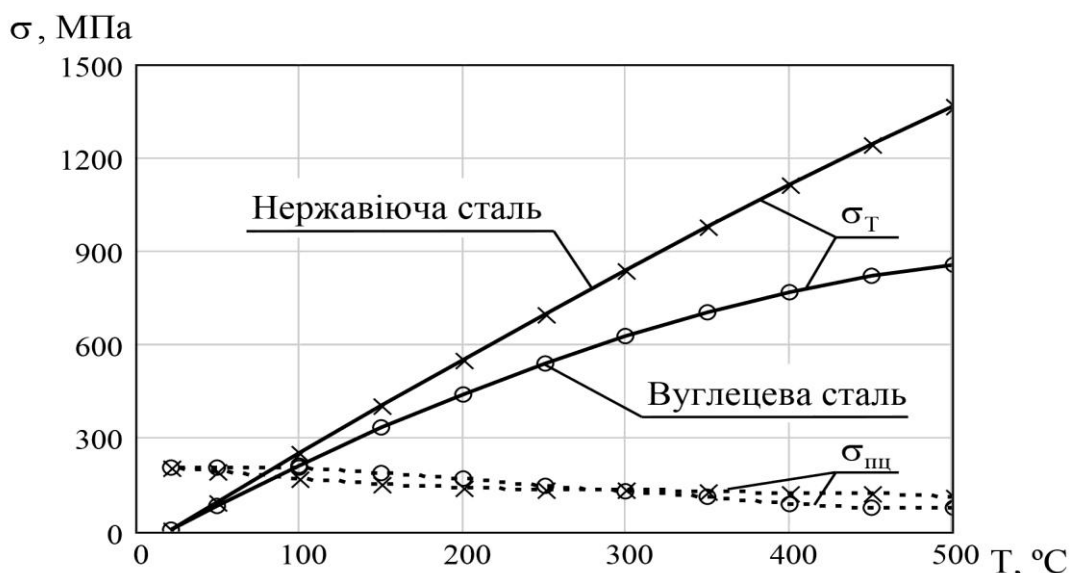


Рис. 3. Залежності від температури нормального напруження σ_T , що виникає внаслідок нагрівання, та границі пропорційності $\sigma_{пц}$ для вуглецевої та нержавіючої сталей

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 [14]

$$T_{C3y}(t) = 345 \lg(8t + 1) + 20, \quad (4)$$

де t – час, що пройшов з моменту займання, хвилини. При пожежі у обмежених приміщеннях теплообмін змінюється, температурний режим пожежі $T_{C3y}(t)$ ускладнюється. все ж досягаючи значних величин [7, 16]. Для формалізації залежностей, що визначають динаміку температури у приміщенні при виникненні пожежі використовують різні моделі [15], але їх загальним недоліком, як і при побудові стандартного температурного режиму, є визначення середньооб'ємного значення температури у приміщенні.

Розглянемо випадок локалізованого розташування палих речовин у приміщенні (схему розташування представлено на рис. 4).

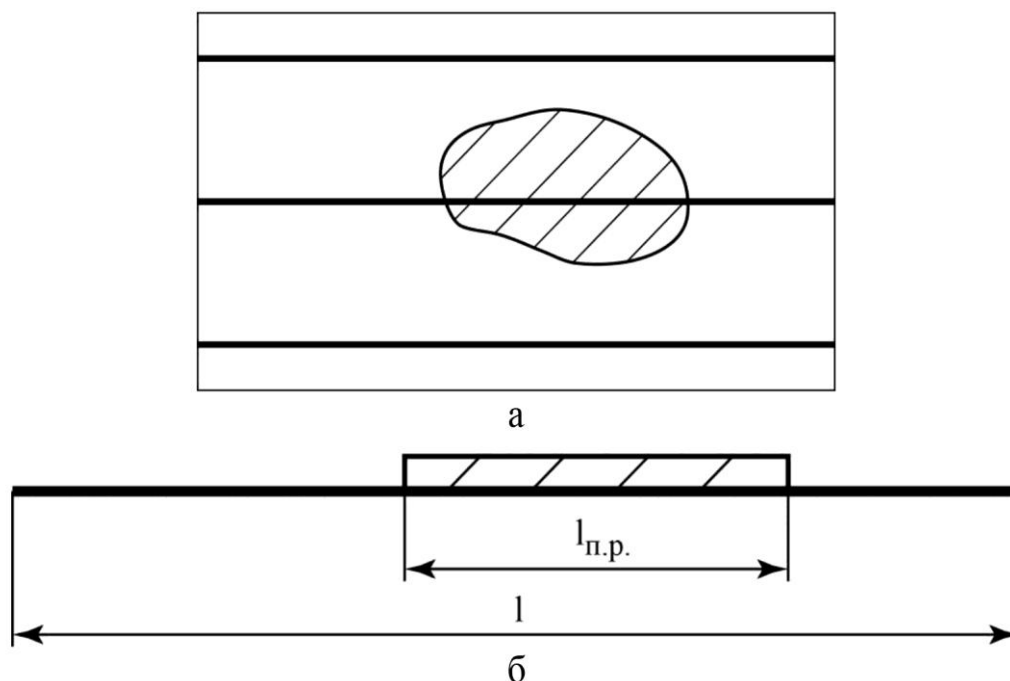


Рис. 4. Схема локалізованого розташування палих речовин у приміщенні (а) та відносно балки (б)

Нехай температура елемента конструкції на кожній ділянці окремо є постійною. У випадку застосування засобів пожежогасіння температура $T_k^{в.с.}(t)$ частини балки у місці контакту перекриття з вогнегасильною сумішшю буде зменшуватися за рахунок теплообміну з нею. Натомість розташовані на поверхні палні речовини перешкоджатимуть цьому контакту, а отже температура $T_k^{п.р.}(t)$ частини, що контактує з палими речовинами, буде зменшуватися набагато повільніше, а й деяких випадках може навіть збільшуватися за умови продовження горіння.

Сумарну температурну деформацію балки за умов, прийнятих у роботі, можна визначити за формулою:

$$\varepsilon_T(t) = \varepsilon_T(T_k^{п.р.}(t)) \cdot \frac{l_{п.р.}}{l} + \varepsilon_T(T_k^{в.с.}(t)) \cdot \frac{l - l_{п.р.}}{l}, \quad (7)$$

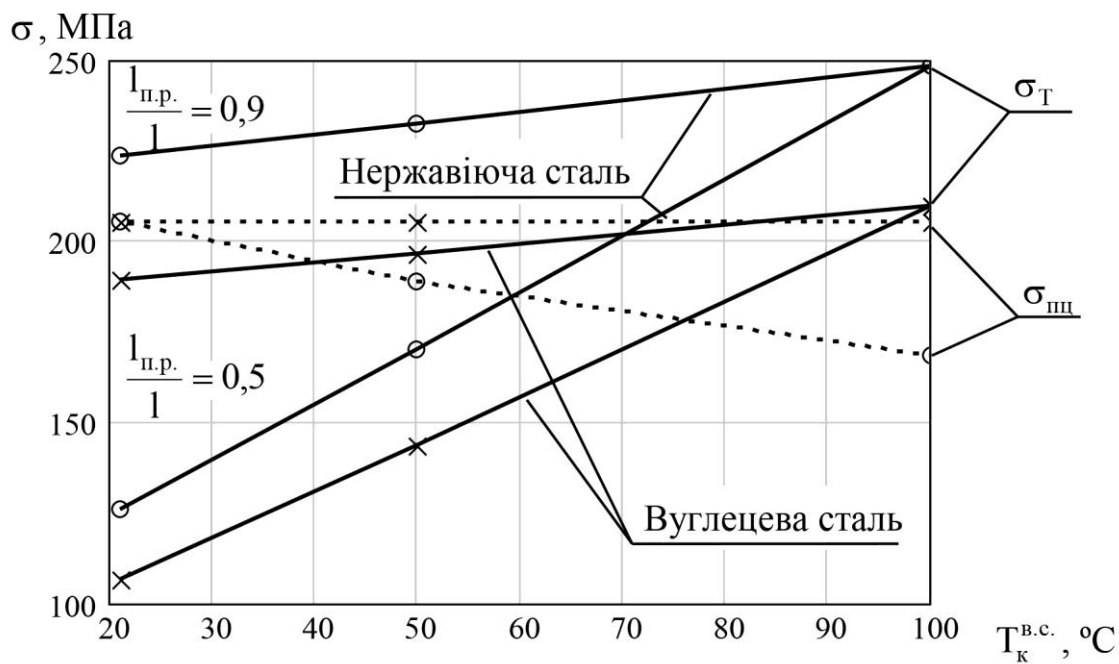
$$\varepsilon_T(T_k^{п.р.}(t)) > \varepsilon_T(t) > \varepsilon_T(T_k^{в.с.}(t)). \quad (8)$$

Оскільки значення модулю пружності змінюються в залежності від температури напруження σ_T за ділянками також буде змінюватися за залежністю:

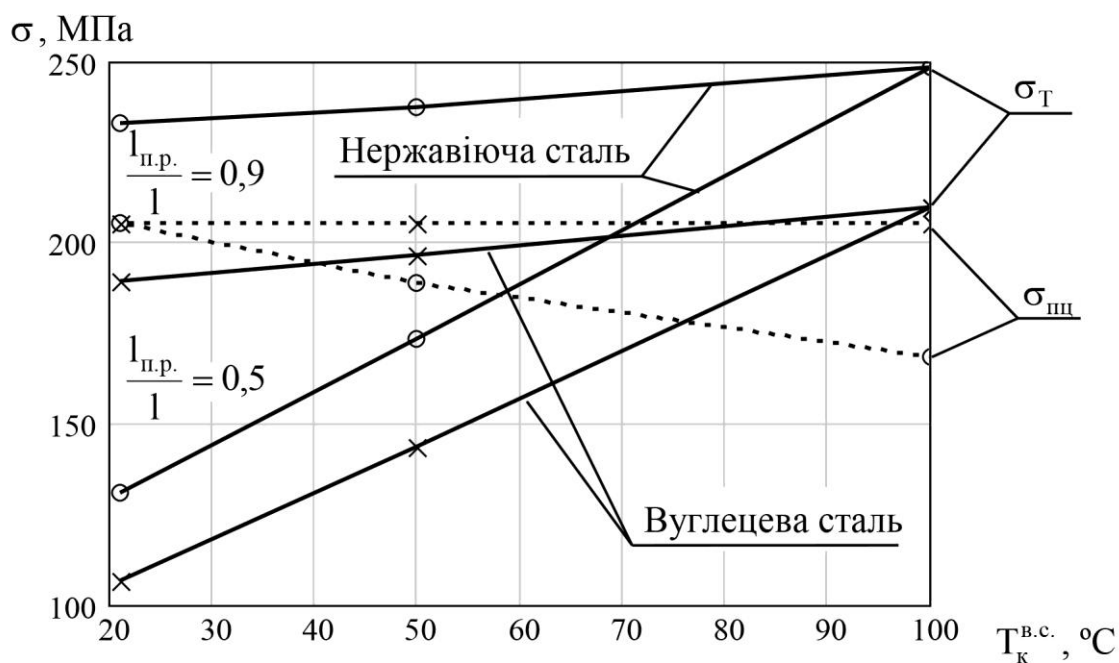
$$\sigma_T(z, t) = \varepsilon_T(t) \cdot E(z, t). \quad (9)$$

На рис. 5 представлені залежності теплового напруження у різних частинах балки з початковою температурою 100°C від температури, до

якої необхідно її охолодити, отримані в результаті моделювання з використанням імітаційної моделі [13]. Як можна бачити, за описаного розвитку подій за рахунок перерозподілу температурних деформацій напруження $\sigma_T^{п.р.}(t)$ на ділянці контакту з пальними речовинами зменшиться, напруження ж $\sigma_T^{в.с.}(t)$ на ділянці контакту з вогнегасильною сумішшю, навпаки, збільшиться.



а



б

Рис. 5. Залежності теплового напруження у частинах балки, що контактують з пальними речовинами (а) та вогнегасильною сумішшю (б), від значення температури охолодження

Можна бачити, що за зменшення ділянки вільного контакту з вогнегасильної сумішшю розрахункове напруження на ній збільшується. З урахуванням усього вищесказаного, а також того, що межі міцності та текучості матеріалу зі збільшенням температури звужуються множина критеріїв оцінювання безпеки для імітаційної моделі, сформованої у [13], остаточно отримує вигляд:

$$\chi_1 = \max_{0 \leq z \leq l} \left(\frac{\sigma(z, t)}{[\sigma](z, t)} \right) \leq 1; \quad (10)$$

$$\chi_2 = \max_{0 \leq z \leq l} \left(\frac{\tau(z, t)}{[\tau](z, t)} \right) \leq 1; \quad (11)$$

$$\chi_3 = \max_{0 \leq z \leq l} \left(\frac{\sigma_{\text{екв}}(z, t)}{[\sigma](z, t)} \right) \leq 1. \quad (12)$$

Висновки. Запропоновані критерії визначення рівня безпеки можуть бути використані для визначення меж вогнестійкості несучих конструкцій будівель та споруд під час пожеж, що виникають в них, а також при визначення параметрів режимів функціонування систем та засобів, що використовуватимуться для їх ліквідації. Моделюючи залежності, визначені для міцності елемента несучої конструкції, відповідають вимогам, що висуваються до математичних моделей вогнестійкості конструкцій за ДБН В.1.1.7-2002 [1]. Для підвищення точності оцінювання результатів моделювання необхідно створити моделюючи залежності теплообміну у динаміці перебігу пожежі, який відбувається між навколишнім середовищем та елементами конструкції та, а також між їх різними ділянками.

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. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol33/vasilchenko.pdf>
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. – Режим доступа до журн. : <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol32/gulida.pdf>.

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. – Режим доступа до журн. : <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol29/>.

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. Колосков В.Ю. Моделювання міцності несучих конструкцій будівель під час пожежі / В.Ю. Колосков // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 38. – Х.: НУЦЗУ, 2015. – С. 83-90. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol38/Koloskov.pdf>.

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

15. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 98 с.

16. Поспелов Б.Б. Анализ случайной динамики среднеобъемной температуры и ресурса пожара в помещении / Б.Б. Поспелов, В.А. Андронов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Вып. 38. – Х.:

НУЦЗУ, 2015. – С. 136-145. – Режим доступа до журн.: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol38/PospelovAndronov.pdf>.

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.