

Технічні науки

УДК 614.822

Поздєєв Сергій Валерійович

*доктор технічних наук, професор,
головний науковий співробітник*

*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

Поздеев Сергей Валерьевич

*доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник*

*Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины*

Pozdieiev Serhii

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of
National University of Civil Protection of Ukraine*

Швиденко Андрій Валерійович

*кандидат технічних наук, доцент,
начальник кафедри організації заходів цивільного захисту
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

Швыденко Андрей Валерьевич

*кандидат технических наук, доцент,
начальник кафедры организации мероприятий гражданской защиты
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины*

Shvydenko Andrii

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of
National University of Civil Protection of Ukraine*

Зажома Віталій Михайлович

*кандидат технічних наук,
доцент кафедри техніки та засобів цивільного захисту
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

Зажома Виталий Михайлович

*кандидат технических наук,
доцент кафедры техники и средств гражданской защиты
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины*

Zazhoma Vitalii

*Candidate of Technical Sciences
Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of
National University of Civil Protection of Ukraine*

Радченко Валерій Андрійович

*ад'юнкт
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

Радченко Валерий Андреевич

*адъюнкт
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины*

Radchenko Valerii

Adjunct

*Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of
National University of Civil Protection of Ukraine*

Борсук Олена Володимирівна

*старший викладач-методист факультету пожежної безпеки
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

Борсук Елена Владимировна

*старший преподаватель-методист факультета пожарной безопасности
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины*

Borsuk Olena

*Senior Teacher-Methodist of the Faculty of Fire Safety
Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of
National University of Civil Protection of Ukraine*

**МЕТОД РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТІ
ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬ УНАСЛІДОК
ПОЖЕЖІ
МЕТОД РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ
ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ
ПОЖАРА
METHOD FOR CALCULATING THE POSSIBILITY OF
PROGRESSIVE DESTRUCTION OF BUILDINGS AS A RESULT OF
THE FIRE**

Анотація. Під час аналізу пожежної безпеки будівельних конструкцій окрім розгляду їх вогнестійкості, межі поширення полум'я та інших пожежно-технічних характеристик має бути розглянута імовірність їх прогресуючого обвалення при ушкодженні їх окремих елементів. У статті запропонований метод розрахунку для оцінки можливості прогресуючого руйнування, заснований на припущенні, що один, або декілька стиснутих елементів піддаються ушкодженню та мають бути вилучені із системи, яка забезпечує її жорсткість та геометричну незмінність. Запропонований метод є продуктивним і економічним у порівнянні із існуючими методами, які залучають складні математичні моделі та програмні комплекси.

Ключові слова: прогресуюче руйнування, будівельні конструкції, метод розрахункової оцінки.

Аннотация. При анализе пожарной безопасности строительных конструкций кроме рассмотрения их огнестойкости, пределы распространения пламени и других пожарно-технических характеристик должна быть рассмотрена вероятность их прогрессирующего обрушения при повреждении их отдельных элементов. В статье предложен метод расчета для оценки возможности прогрессирующего разрушения, основан на предположении, что один или несколько сжатых элементов подвергаются повреждению и должны быть удалены из системы, которая обеспечивает ее жесткость и геометрическую неизменность. Предложенный метод является продуктивным и экономичным в сравнение с существующими методами, которые привлекают сложные математические модели и программные комплексы.

Ключевые слова: прогрессирующее разрушение, строительные конструкции, метод расчетной оценки.

Summary. *In the analysis of fire safety of building structures, in addition to considering their fire resistance, the extent of the spread of flames and other fire-technical characteristics, the probability of their progressive collapse should be considered when their individual elements are damaged. The paper proposes a calculation method for evaluating the possibility of progressive fracture, based on the assumption that one or more compressed elements are damaged and should be removed from the system, which ensures its rigidity and geometric stability. The proposed method is productive and economical compared to existing methods that involve complex mathematical models and software complexes.*

Key words: *progressive destruction, building structures, calculation method of estimation.*

Статистика пожеж та нещасних випадків, які пов'язані із пожежами, свідчить, що одним з найбільш небезпечних чинників є руйнація несучих залізобетонних будівельних конструкцій, як це показано у роботах [1-3]. Причому рівень руйнувань досягає максимального рівня коли ушкодження одного або декількох елементів конструкцій призводить до серій обвалень інших елементів, унаслідок цього руйнується частина будівля, або вона руйнується повністю. За умов прогресуючого руйнування соціально-економічні втрати є максимальними. Одним з ефективних заходів забезпечення живучості будівель та споруд є впровадження сучасних розрахункових методів прогнозування можливості прогресуючого руйнування та вживання відповідних інженерних заходів підсилення будівельних конструкцій.

Згідно з даними досліджень [4] одним з найбільш ефективних та економічних методів інженерного оцінювання можливості прогресуючого руйнування будівель та споруд є кінематичний метод. Метод, що застосований у даних дослідженнях, для кожного з наперед прийнятих механізмів прогресуючого руйнування визначаються роботи внутрішніх сил

(W) і зовнішніх навантажень (U) на можливих переміщеннях розглянутого механізму, на який перетворюється статична система. Умовою зберігання незмінності статичної системи при цьому є виконання нерівності

$$W \geq U. \quad (1)$$

Схема каркасу будівлі у аварійному стані допускає, що зруйнована колона видаляється повністю з із схеми жорсткості будівлі, і не вважається частиною механізму, на який перетворюється будівля, із наявними пластичними шарнірами у ній. При цьому даний метод має певний недолік, який полягає у тому, що лінії пластичних шарнірів є прямолінійними, відділені зони між лініями пластичних шарнірів являють собою трикутні фасетки. Такий підхід може привести до того, що необґрунтоване переобтяження схеми ліній пластичних шарнірів додатковими лініями може призвести до суттєвого спотворення результатів і накладає необхідність введення додаткових коефіцієнтів запасу міцності у досліджуваних конструкціях.

Інший підхід до розрахункового прогнозування прогресуючого руйнування описаний та ефективно застосовний у дослідженнях [5]. Даний підхід заснований на застосуванні методу скінченних елементів у комбінації методу штрафних функцій при розділенні та співударянні частин із скінченними елементами, знов утворених в процесі розрахунку аварійної системи. Такий підхід потребує застосування трудомістких та тривалих у часі розрахунків із залученням складного програмного забезпечення та кваліфікованого інженерного персоналу.

Мета проведеного дослідження, основні результати якого наведені у статті, полягає у розробці математичного описання робіт зовнішніх та внутрішніх сил у кінематичній схемі системи, на яку перетворюється конструкція будівлі при введенні ліній пластичних шарнірів у перекриттях, що обмежують криволінійні частини даної геометрично змінної системи як

підґрунтя удосконаленого кінематичного методу розрахунку щодо прогнозування прогресуючого руйнування у будівлях із залізобетонними конструкціями.

Для розгляду прогресуючого руйнування за прийнятих припущень застосовується універсальна розрахункова схема, наведена на рис. 1. Дана схема відповідає кінематичному розрахунку частини будівлі із одним елементом, для якого допускається руйнування унаслідок пожежі. При цьому враховано, що руйнування колони відбувається після руйнування перекриття під впливом можливої пожежі.

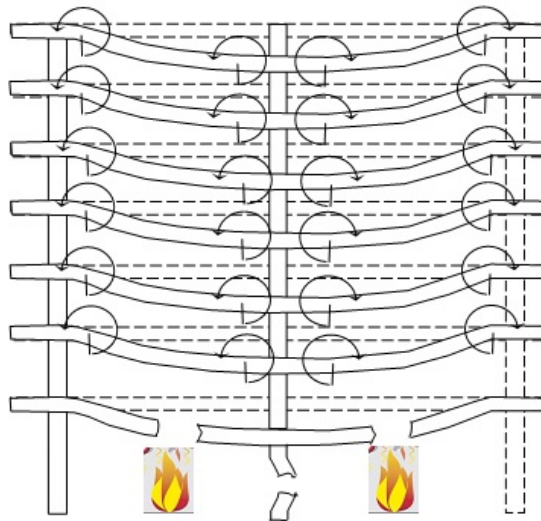


Рис. 1. Розрахункова схема для розрахунку прогресуючого руйнування будівлі із залізобетонними конструкціями

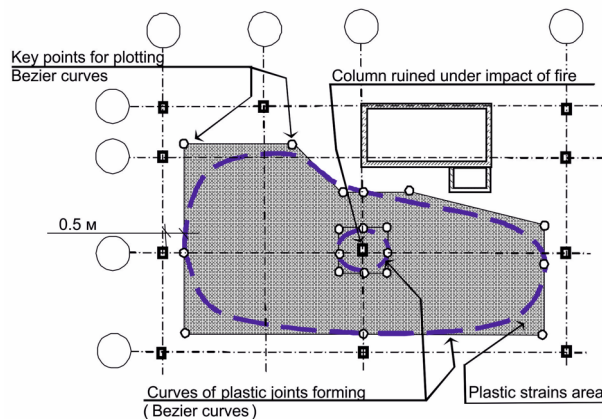


Рис. 2. Відтворення ліній утворення пластичних шарнірів за допомогою кривих Без'є

На рис. 2 наведена схема відтворення ліній пластичних шарнірів за допомогою кривих Без'є. Гіпотеза, що лінії пластичних шарнірів можна відтворити за допомогою кривих Без'є, була прийнята у припущенні про розташування пластичних шарнірів по дотичним, які ділять паралельні лінії до рядів незруйнованих колон та стін у процентному співвідношенні, залежному від перемінної функції кривих Без'є.

Згідно із fig. 2 мають бути розглянуті дві лінії утворення пластичних шарнірів – лінія навколо колони (діафрагми жорсткості) та лінія, що огинає несучі стиснуті елементи вибраної частини будівлі, підданої прогресуючому руйнуванню. Застосування такої апроксимації зумовлене тим, що криві Без'є є неперервними за похідними першого та другого порядку, дозволяють врахувати особливості зони пластичної деформації з визначенням поточних значень відповідних геометричних параметрів для визначення як внутрішніх так і зовнішніх силових факторів.

Рівняння функції, що описує криву Без'є, записується у неявній формі і представляє собою систему з двох параметричних рівнянь [6]:

$$x(u) = \sum_{k=1}^n x_k B_{k,n}(u), \quad y(u) = \sum_{k=1}^n y_k B_{k,n}(u), \quad (2)$$

де x_k та y_k – координати вузлових точок для побудування кривої Без'є.

У формулі (2) поліноми Бернстайна визначається за формулою [6]:

$$B_{k,n}(u) = \frac{n!}{k!(n-k)!} u^k (1-u)^{n-k}. \quad (3)$$

де n – кількість контрольних точок; k – поточний номер вузлової точки.

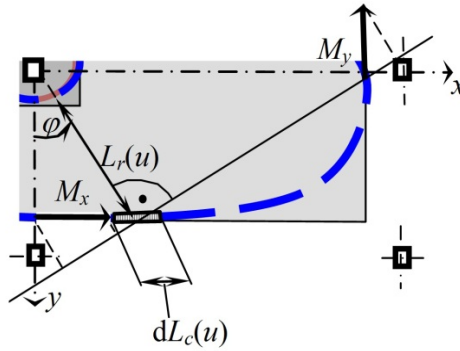


Рис. 3. Схема для визначення роботи граничних внутрішніх сил у пластичних шарнірах перекриття

Використовуючи вирази (2) та (3), можна визначити віртуальну роботу внутрішніх сил за схемами, що наведені на fig. 3 та fig. 4.

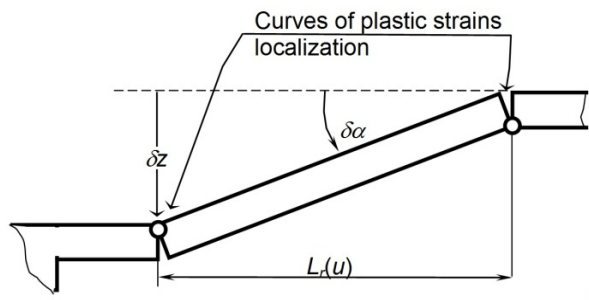


Рис. 4. Схема для визначення можливих переміщень при визначенні роботи внутрішніх сил у перекриттях

За наведеними розрахунковими схемами визначається робота внутрішніх сил на можливому переміщенні δz з використанням виразів:

$$W_{sl1} = \int_0^1 (M_{x1} \cos \varphi + M_{y1} \sin \varphi) L_{c1}(u) \frac{\delta z}{L_r(u)} du, \quad W_{sl2} = \int_0^1 (M_{x2} \cos \varphi + M_{y2} \sin \varphi) L_{c2}(u) \frac{\delta z}{L_r(u)} du, \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}, \quad \sin \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = y(u)/x(u), \quad (5)$$

$$L_{c1}(u) = \sqrt{\left(\frac{dx_1(u)}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy_1(u)}{du}\right)^2}, \quad L_{c2}(u) = \sqrt{\left(\frac{dx_2(u)}{du}\right)^2 + \left(\frac{dy_2(u)}{du}\right)^2} \quad (6)$$

$$L_r(u) = \sqrt{(x_1(u))^2 + (y_1(u))^2} - \sqrt{(x_2(u))^2 + (y_2(u))^2}, \quad W = W_{sl1} + W_{sl2}, \quad (7)$$

де M_x, M_y – погонні граничні моменти при пластичному граничному деформуванні плит перекриттів, визначені методом граничних деформацій. Перші похідні від функцій, які описують криві Без'є, визначаються з виразів [6]:

$$\frac{dx(u)}{du} = \sum_{k=1}^n x_k B'_{k,n}(u), \quad \frac{dy(u)}{du} = \sum_{k=1}^n y_k B'_{k,n}(u), \quad B'_{k,n}(u) = B_{k,n}(u) \frac{k-nu}{u(1-u)} \quad (8)$$

При реалізації даної розрахункової методики має бути отримане значення перемінної для визначення функції внутрішньої кривої Без'є навколо вертикального опорного елемента, відповідне поточному куту φ . Для цього застосовуються такі формули:

$$x_2(u) = \sum_{k=1}^n x_k B_{k,n}(p(u)), \quad y_2(u) = \sum_{k=1}^n y_k B_{k,n}(p(u)), \quad (9)$$

$$p(u) = \frac{p_1(u) - p_2(u) + \sqrt{p_2^2 - p_1(u)p_3(u)}}{p_1(u) - 2p_2(u) + p_3(u)}, \quad p_k(u) = y_k - x_k \frac{y_1(u)}{x_1(u)}. \quad (10)$$

За наведеними розрахунковими схемами визначається робота внутрішніх сил в одному квадранті на можливому переміщенні δz з використанням виразів:

$$U_{sl} = U_{sl1} + U_{sl2}, \quad U_{sl1} = \frac{1}{6} \eta_{fi} Q_{sl} \delta z \int_0^1 L_{c1}(u) L_{r1}(u) du - \frac{1}{2} \eta_{fi} Q_{sl} \delta z \int_0^1 \frac{L_{c2}(u) L_{r2}(u)}{L_r(u)} \left(\frac{1}{3} L_{r2}(u) + L_r(u) \right) du, \quad (11)$$

$$U_{sl2} = \frac{1}{2} \eta_{fi} Q_{sl} \delta z \int_0^1 L_{c2}(u) L_{r2}(u) du - 0.25 \eta_{fi} Q_{sl} \delta z \cdot S_c, \quad (12)$$

$$L_{r1}(u) = \sqrt{(x_1(u))^2 + (y_1(u))^2}, \quad L_{r2}(u) = \sqrt{(x_2(u))^2 + (y_2(u))^2}, \quad (13)$$

Також маємо за необхідне визначити роботу зовнішніх сил за рахунок власної ваги колон. Для цього застосовується формула:

$$U_c = (\rho_c A_c + \rho_s A_s) L_c (1 + 1/N) \delta \varepsilon. \quad (14)$$

де ρ_c – густина бетону; ρ_s – густина арматурної сталі; N – кількість перекриттів, що не зруйнувалися під час пожежі; S_c – площа поперечного перерізу колони або діафрагми жорсткості; S_s – площа поперечного перерізу армування колони або діафрагми жорсткості; L_p – довжина колони у межах поверху.

Загальна робота зовнішніх сил на можливих переміщеннях дорівнює:

$$U = U_{sl} + U_c. \quad (15)$$

Інтегрування виразів (4), (11) та (12) проводиться одним чисельних методів. В даному випадку рекомендується застосування методу Ромберга [7].

Для проведення розрахунку щодо визначення можливості прогресуючого руйнування будівлі внаслідок пожежі мають бути виконані наступні процедури.

1. Визначається одна або група колон (діафрагм) що вилучаються із схеми жорсткості будівлі як зруйновані внаслідок пожежі.
2. Визначаються точки границі зони пластичних деформацій для першої та другої лінії пластичних шарнірів. Отримана зона повинна мати границі що проходять через точки, розташовані на відстані 0.5 м від груп незруйнованих колон та діафрагм жорсткості. Отримана зона розділяється на декілька частин осьовими лініями, що проводяться через центр тяжіння перерізу колони або перерізів групи колон.
3. Визначаються граничні моменти у плитах перекриттів за умов нормальних температур.
4. Визначається положення точок через які мають пройти криві локальної пластичної деформації (лінії Без'є) і записуються вектори координат цих точок для параметричних функцій, що їх описують відповідно до формули (2).

5. Використовуючи формули (4) – (10), визначаються можлива робота внутрішніх сил у кожній з частин, на які була розбита зона пластичних деформацій навколо видалених колон. Загальна можлива робота визначається як сума всіх отриманих компонентів.

6. Використовуючи формули (11) та (15), визначається сумарна можлива робота зовнішніх сил.

7. Перевіряється виконання умови (1) та робиться висновок про можливість прогресивного руйнування будівлі внаслідок пожежі.

У результаті проведених досліджень були отримані такі результати:

- розроблений математичний апарат для визначення віртуальних робіт для зовнішніх та внутрішніх сил кінематичних систем, на які перетворюються конструктивні системи будівель та споруд в аварійному стані унаслідок дії пожежі;
- на основі запропонованого математичного апарату удосконалений кінематичний розрахунковий метод прогнозування можливості прогресуючого руйнування.

Література

1. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02027, DOI: 10.1051/matecconf/201711602027.
2. Nekora O., Slovynsky V., Pozdieiev S. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024, DOI: 10.1051/matecconf/201711602024.
3. Nuyanzin O., Pozdieiev S., Hora V., Shvydenko A., Samchenko T. Cable tunnels temperature fire mode experimental study // Eastern European Journal

of Enterprise Technologies, 2018. No. 3. PP. 21-28.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792/>

4. Shapiro G.I., Eisman Yu.A., Zalesov A.S., Rekomendacii po zachite monolitnyh zdanii ot progressiruyuchego obrushenia. Moskomarchitectury. Moscow. (2005). 28 p.
5. Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA, (2005). 680 p.
6. Hearn D., Baker M.P., Carithers W.R. Computer graphics with Open GL. 4-th edition. Harlow : Pearson Education Limited, (2014). 812 p.
7. Piskunov N. Differential and integral calculus for technical institutes. 13-th edition. Moscow: Science, Main redaction of technical literature, 1985. 560 p.