

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ЩОДО СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ

**¹Швиденко А.В., ¹Поздєєв С.В., ¹Костенко Т.В., ¹Землянський О.М.,
¹Сидорук О.В.**

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ ВСЛЕДСТВИЕ ПОЖАРА

¹Швыденко А.В., ¹Поздеев С.В., ¹Костенко Т.В., ¹Землянский А.Н., ¹Сидорук А.В.

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету громадянської захисту України

SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR THE CALCULATED EVALUATION OF THE RESISTANCE OF BUILDINGS TO PROGRESSING DESTRUCTION DUE TO THE FIRE

¹Shvydenko A.V., ¹Pozdieiev S.V., ¹Kostenko T.V., ¹Zemlianskyi O.M., ¹Sydooruk O.V.

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine

Анотація. При аналізі пожежної безпеки будівельних конструкцій, крім розгляду їх вогнестійкості, меж поширення полум'я та інших пожежно-технічних характеристик, повинна бути розглянута можливість прогресуючого обвалення при пошкодженні їх окремих елементів. З огляду на унікальність, масивність і вартість залізобетонних та інших конструкцій будівель, їх вогневі випробування є неефективними, оскільки вони передбачають виготовлення по два зразки конструкцій з дотриманням усіх технологій. В умовах прогресуючого обвалення конструкцій соціально-економічні втрати набувають великих масштабів. Оцінка можливості прогресуючого обвалення можлива тільки при використанні розрахункового підходу. Таке положення, що викликає необхідність проведення розрахунків за оцінкою можливості прогресуючого руйнування будівель і споруд, зафіксовано у будівельних нормах багатьох країн. У статті запропоновано метод розрахунку для оцінки можливості прогресуючого руйнування, заснований на припущенні, що один або кілька стиснутих елементів піддаються пошкодженню і повинні бути видалені з системи, що забезпечує її жорсткість і геометричну незмінність. Основним базовим положенням методу є гіпотеза утворення у плиті перекриття лінії пластичних шарнірів, яка може бути описана за допомогою кривої Безье. Оцінка можливості прогресуючого руйнування проводиться енергетичним критерієм на основі порівняння робіт внутрішніх і зовнішніх сил на можливих переміщеннях системи, що при таких умовах є геометрично змінюваною. Запропонований метод є продуктивним і економічним у порівнянні з існуючими методами, які використовують складні математичні моделі і програмні комплекси. Використані методики базуються на стандартах, гармонізованих з відповідною методичною та нормативною бази Євросоюзу, і узгоджуються з результатами досліджень вітчизняних і зарубіжних авторів, апробовані, обговорені та визнані науковим співтовариством і входять в основну базу літературних посилань і цитування фахівцями даної галузі.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, межа вогнестійкості, граничний стан елемента конструкції, клас вогнестійкості, максимальний рівень напруги, елемент конструкції, наведений поперечний переріз, протипожежна стіна.

Статистика пожеж та нещасних випадків, пов'язаних з 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, внаслідок цього руйнується частина або повністю будівля. 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 із найбільш ефективних та економічних методів інженерного оцінювання можливості прогресуючого руйнування будівель та споруд є кінематичний метод. Метод, що застосований у наших дослідженнях: для кожного з наперед прийнятих механізмів прогресуючого руйнування визначаються роботи внутрішніх сил і зовнішніх навантажень на можливих переміщеннях розглянутого механізму, на який перетворюється статична система. Умовою зберігання незмінності статичної системи при цьому є виконання нерівності:

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

де: W - робота внутрішніх сил; U – зовнішні навантаження.

Схема каркасу будівлі у аварійному стані допускає, що зруйнована колона видаляється повністю з ієрархії 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 застосований 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.

На рис. 2 наведена схема відтворення ліній пластичних шарнірів за допомогою кривих Без'є.

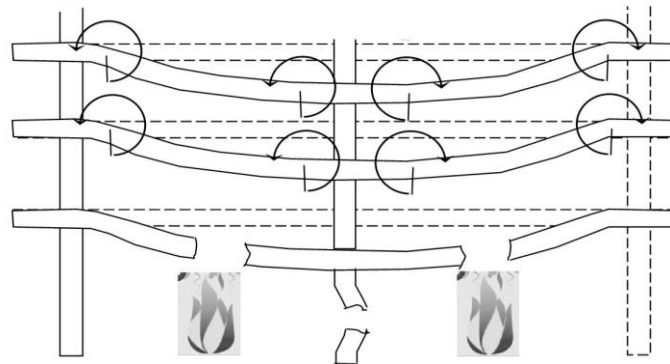


Рисунок 1 - Розрахункова схема для розрахунку прогресуючого руйнування будівлі із залізобетонними конструкціями.

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 [6].

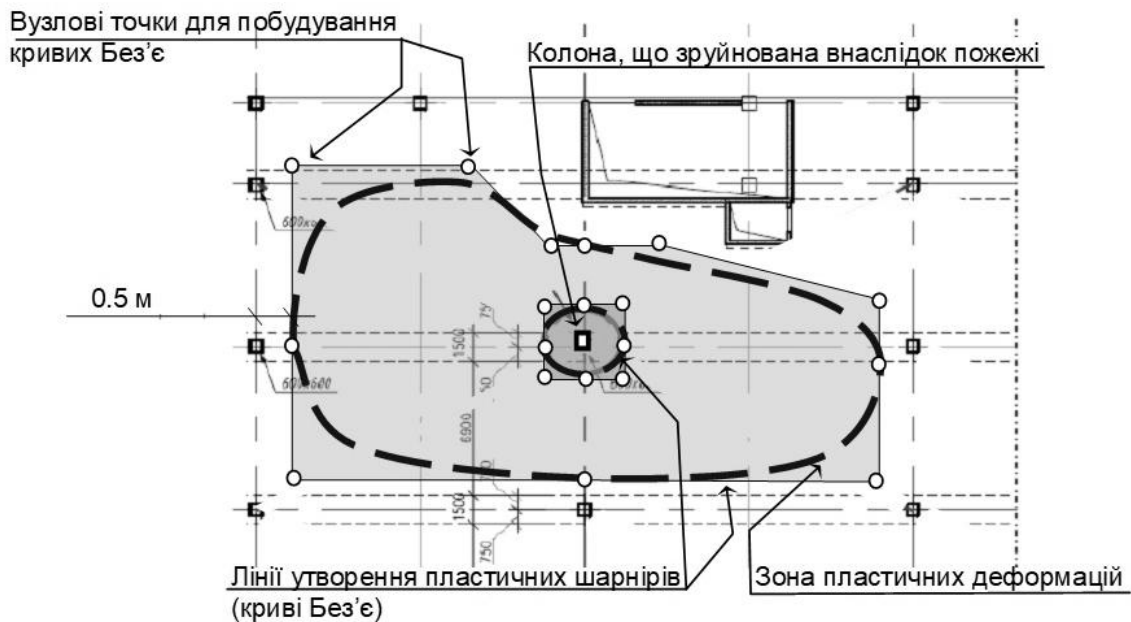


Рисунок 2 – Відтворення ліній утворення пластичних шарнірів за допомогою кривих Без'є.

Згідно із рис. 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 зовніш-ніх 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 побудовання кривої Без'є.

У формулі (2) поліноми Бернштейна визначаються 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.

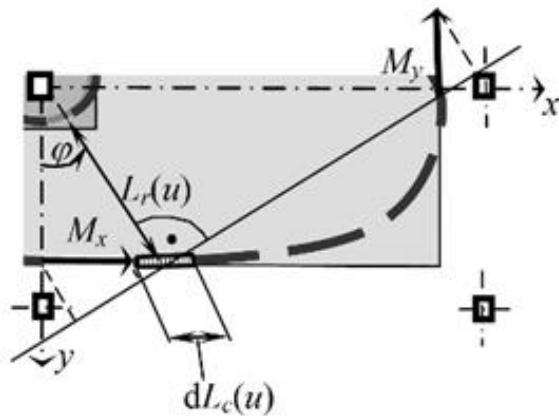


Рисунок 3 – Схема для визначення роботи граничних внутрішніх сил у пластичних шарнірах перекриття.

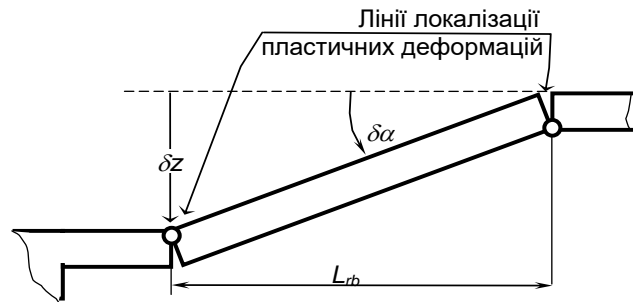


Рисунок 4 – Схема для визначення можливих переміщень при визначенні роботи внутрішніх сил у перекриттях.

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

За наведеними розрахунковими схемами визначається робота внутрішніх сил на можливому переміщенні δz ($\delta z = 1$) з використанням виразів:

$$W = (M_x \cos \varphi + M_y \sin \varphi) \int_0^1 \frac{L_{c1}(u) + L_{c2}(u)}{L_r(u)} \delta z du; \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \frac{y(u)}{x(u)} \left(1 + \frac{y(u)^2}{x(u)^2} \right)^{-0.5}; \quad \sin \varphi = \left(1 + \frac{y(u)^2}{x(u)^2} \right)^{-0.5}; \quad (4)$$

$$L_{c1}(u) = \sqrt{\left(\frac{dx_e(u)}{du} \right)^2 + \left(\frac{dy_e(u)}{du} \right)^2}; \quad L_{c2}(u) = \sqrt{\left(\frac{dx_i(u)}{du} \right)^2 + \left(\frac{dy_i(u)}{du} \right)^2}; \quad (5)$$

$$L_r(u) = \sqrt{(x_e(u))^2 + (y_e(u))^2} - \sqrt{(x_i(u))^2 + (y_i(u))^2}. \quad (6)$$

де M_x , M_y – погонні граничні моменти при пластичному граничному деформуванні плит перекриттів, визначені методом граничних деформацій. Індекс e відноситься до зовнішньої кривої лінії локальної області концентрації пластичних деформацій, а індекс i до внутрішньої.

Перші похідні від функцій, які описують криві Без'є, визначаються з виразів [6]:

$$\frac{dx(u)}{du} = \sum_{k=1}^n x_k B'_{k,n}(u), \quad \frac{dy(u)}{du} = \sum_{k=1}^n y_k B'_{k,n}(u), \quad B'_{k,n}(u) = B_{k,n}(u) \frac{k-nu}{u(1-u)}. \quad (7)$$

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:

$$x_{e,i}(u) = \sum_{k=1}^n x_k B_{k,n}(p(u)); \quad y_{e,i}(u) = \sum_{k=1}^n y_k B_{k,n}(p(u)); \quad (8)$$

$$p(u) = \frac{p_1(u) - p_2(u) + \sqrt{p_2^2 - p_1(u)p_3(u)}}{p_1(u) - 2p_2(u) + p_3(u)}; \quad p_k(u) = y_k - x_k \frac{y_e(u)}{x_e(u)} \quad (9)$$

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

$$U_{sl} = U_{sl1} + U_{sl2}; \quad (10)$$

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

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

$$L_{r1}(u) = \sqrt{(x_e(u))^2 + (y_e(u))^2}, \quad L_{r2}(u) = \sqrt{(x_i(u))^2 + (y_i(u))^2}. \quad (13)$$

Робота зовнішніх сил за рахунок власної ваги колон визначається за формулою:

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

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 (3), (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).

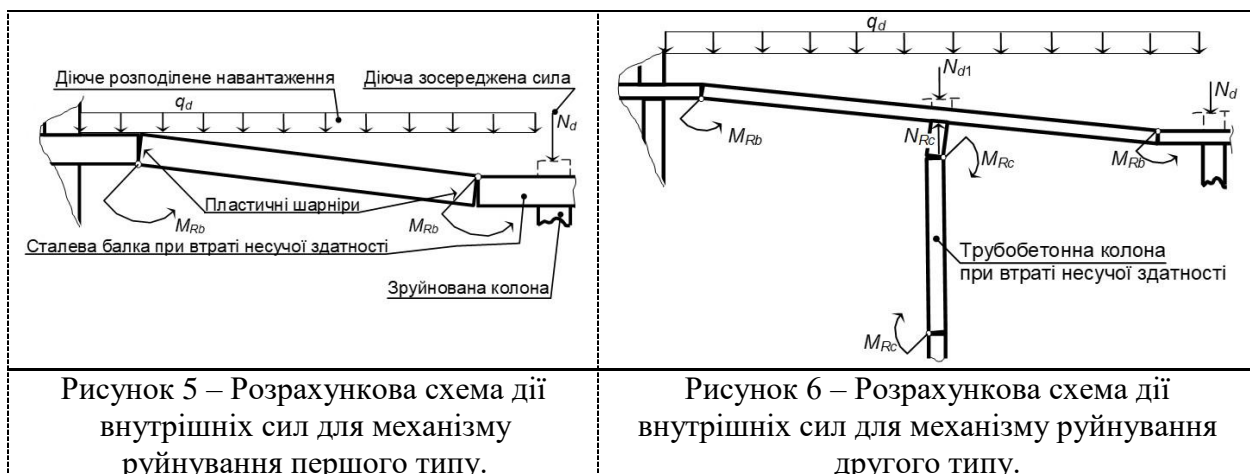
5. Використовуючи формули (4) – (10), визначаються можлива робота внутрішніх сил у кожній з частин, на які була розбита зона пластичних деформацій навколо видалених колон. Загальна можлива робота визначається як сума всіх отриманих компонентів.

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

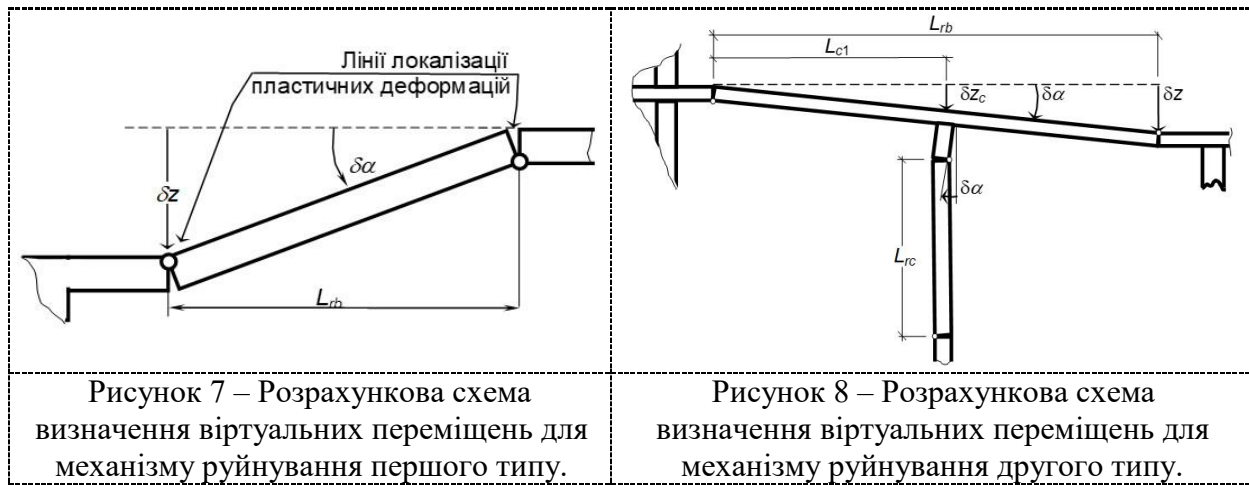
7. Перевіряється виконання умови (1) та робиться висновок про можливість прогресивного руйнування будівлі внаслідок пожежі.

Для оцінки прогресуючого руйнування будівель із каркасом із залізобетонними балками пропонується методика, що приведена нижче.

Для розгляду прогресуючого руйнування за прийнятих припущень застосовується розрахункова схема механізму руйнування першого типу, яка наведена на рис. 5, на якій позначені внутрішні сили у пластичних шарнірах, що здійснюють опір руйнуванню у даних аварійних умовах. Розрахункова схема механізму прогресуючого руйнування другого типу наведена на рис. 6. Дані схеми відповідають кінематичному розрахунку частини будівлі із одним елементом, для якого допускається руйнування унаслідок пожежі.



На рис. 7 та 8 наведено схеми визначення віртуальних переміщень для визначення віртуальних внутрішніх робіт у кінематичних схемах структур згідно із рис. 5 та рис 6.



За наведеними розрахунковими схемами визначається робота внутрішніх сил на можливому переміщенні δz для першої розрахункової схеми (див рис. 5 та рис. 7) з використанням виразу:

$$W = \frac{2M_{Rb}}{L_{rb}} \delta z, \quad (16)$$

де M_{Rb} – граничний момент при пластичному граничному деформуванні сталевій балці, визначений методом граничних деформацій; L_{rb} – довжина балки між пластичними шарнірами.

Робота внутрішніх сил на можливому переміщенні δz для другої розрахункової схеми (див. рис. 6 та рис. 7) з використанням виразу:

$$W = \frac{2M_{Rb} + M_{Rc}}{L_{rb}} \delta z + \frac{M_{Rc} L_j}{L_{rc} L_{rb}} \delta z + N_{Rc} \frac{L_{c1}}{L_{rb}} \delta, \quad (17)$$

де M_{Rc} – граничний момент при пластичному граничному деформуванні трубобетонної або залізобетонної колони, визначений методом граничних деформацій; L_{rc} – довжина колони між пластичними шарнірами; $L_j = 0.5$ м – найкоротша відстань від пластичного шарніра елемента до її стику із іншим елементом.

За наведеними розрахунковими схемами визначається робота зовнішніх сил на можливому переміщенні δz для першої кінематичної схеми руйнування (див рис. 5 та рис. 7) з використанням виразу:

$$U = 0.5q_d L_{rb} \delta z + N_d \delta z. \quad (18)$$

Робота зовнішніх сил на можливому переміщенні δz для другої кінематичної схеми руйнування (див. рис. 6 та рис. 8) з використанням виразу:

$$U = 0.5q_d L_{rb} \delta z + N_d \delta z + N_{d1} \frac{L_{c1}}{L_{rb}} \delta z. \quad (19)$$

Для розрахунку граничних моментів та граничних сил у колонах застосовується метод граничних станів [8]. Розрахунок виконується із застосуванням схем деформування фрагменту при поступовому переміщенні нейтральної вісі вздовж небезпечного перерізу досліджуваного фрагменту колони [8]. При цьому мають бути побудовані графіки у координатах поздовжня сила – згинальний момент для описання всіх можливих граничних станів колон при втраті несучої здатності при яких наростають пластичні деформації та утворюються пластичні шарніри. Приклад такого графіку наведений на рис. 9 та рис. 10.

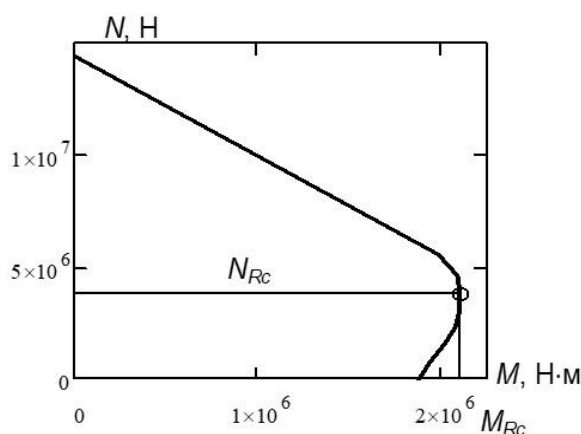


Рисунок 10 – Діаграма «граничний момент – гранична сила» для залізобетонної колони.

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 положення пластичних шарнірів. Вони мають бути розташовані у точках на відстані 0.5 м від груп незруйнованих колон та діафрагм жорсткості. Визначаються необхідні геометричні параметри кінематичних схем для першого та другого механізмів прогресуючого руйнування.

3. Визначаються граничні зусилля у сталевих балках, залізобетонних колонах та трубозалізобетонних колонах за умов нормальних температур.

4. Використовуючи формули (16) та (17) визначаються можлива робота внутрішніх сил у кожній з частин, на які була розбита кінематична схема навколо видалених колон. Загальна можлива робота визначається як сума всіх отриманих компонентів.

5. Використовуючи формули (18) та (19), визначається сумарна можлива робота зовнішніх сил.

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

У результаті проведених досліджень можна зробити такі **висновки**:

- розроблений математичний апарат для визначення віртуальних робіт для зовнішніх та внутрішніх сил кінематичних систем, на які перетворюються конструктивні системи будівель та споруд із балочним та безбалочним каркасом в аварійному стані унаслідок дії пожежі;

- на основі запропонованого математичного апарату удосконалений кінематичний розрахунковий метод прогнозування можливості прогресуючого руйнування будівель та споруд із балочним та безбалочним каркасом в аварійному стані унаслідок дії пожежі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поздєєв С., Нуянзін О., Сідней С., Щипець С. Комп'ютерне моделювання ефективності випробувань на вогнестійкість несучих стін з використанням різних конфігурацій печей згорання // MATEC Web of Conferences. 2017. 116, с. 02027
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602027>
2. Некора О., Словинський В., Поздєєв С. Дослідження несучої здатності залізобетонної балки з використанням комбінованого експериментально-обчислювального методу // MATEC Web of Conference. 2017. 116. С. 02024,
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602024>
3. Нуянзін О., Поздєєв С., Гора В., Швиденко А., Самченко Т. Експериментальне дослідження температурного режиму пожежних каналів в режимі вогню // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2018. № 3. С. 21-28. Режим доступу:
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792>
4. Шапіро Г.І., Ейсман Ю.А., Залесов А.С., Рекомендації по захисту монолітних будівель і прогресуючого обвалення. Москва: Москомархітектура, 2005. 28 с.
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. Піскунов М. Диференційне та інтегральне числення для технічних інститутів. 13-е видання М.: Наука, Головна редакція технічної літератури, 1985. 560 с.
8. EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
9. EN 1993-1-2 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

REFERENCES

1. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S. and Shchipets S. (2017), "Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations", *MATEC Web of Conferences*, 116, art. no. 02027,
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602027>
2. Nekora O., Slovynsky V. and Pozdieiev S. (2017), "The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method", *MATEC Web of Conferences*, 116, art. no. 02024,
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602024>
3. Nuyanzin O., Pozdieiev S., Hora V., Shvydenko A. and Samchenko T. (2018), "Cable tunnels temperature fire mode experimental study", *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, No.3, pp.21-28.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792>
4. Shapiro G.I., Eisman Yu.A. and Zalesov A.S. (2005), *Rekomendatsii po zashchite monolitnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya* [Recommendations for the protection of monolithic buildings and progressive collapse], Moskomarchitecture. Moscow, RU.
5. Hallquist, J.O. (2005), *LS-DYNA Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation, California, US.
6. Hearn D., Baker M.P. and Carithers W.R. (2014), *Computer graphics with Open GL*, w : Pearson Education Limited, Harlow, US.
7. Piskunov N. (1985), *Dyferentsiynе ta integralne chyslennia dlya technichnykh instytutiv* [Differential and integral calculus for technical institutes], Science, Main redaction of technical literature, Moscow, SU.
8. EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
9. EN 1993-1-2 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

Про авторів

Швиденко Андрій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації заходів цивільного захисту Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна, andwell1980@gmail.com.

Поздєєв Сергій Валерійович, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна, svp_chipbbk@ukr.net.

Костенко Тетяна Вікторівна, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна, tatiana.kostenko@gmail.com.

Землянський Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника факультету цивільного захисту Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна, zemapb@gmail.com.

Сідорук Олександр Валерійович, аспірант Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Черкаси, Україна, olex.sidoruk@gmail.com

About the authors

Shvydenko Andrii Valeriiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Head of the Department of Civil Defense Measures Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine. andwell1980@gmail.com.

Pozdieiev Serhii Valeriiovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Chief Researcher, Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine, svp_chipbbk@ukr.net.

Kostenko Tetiana Viktorivna, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Associate Professor, Professor of the Department of Construction Objects Safety and Labor Protection Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine, tatiana.kostenko@gmail.com.

Zemlianskyi Aleksandr Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Deputy Head of Faculty of Civil Protection, Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine, zemapb@gmail.com.

Sidoruk Oleksandr Valeriiovych, Doctoral Student, Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine, olex.sidoruk@gmail.com.

Аннотация. При анализе пожарной безопасности строительных конструкций, кроме рассмотрения их огнестойкости, пределов распространения пламени и других пожарно-технических характеристик, должна быть рассмотрена вероятность прогрессирующего обрушения при повреждении их отдельных элементов. Учитывая уникальность, массивность и стоимость железобетонных и других конструкций зданий, их огневые испытания являются неэффективными, поскольку они предусматривают изготовление по два образца конструкций с соблюдением всех технологий. В условиях прогрессирующего обрушения конструкций социально-экономические потери приобретают крупные масштабы. Оценка возможности прогрессирующего обрушения возможна только при использовании расчетного подхода. Такое положение, вызывающее необходимость проведения расчетов по оценке возможности прогрессирующего разрушения зданий и сооружений, зафиксировано в строительных нормах многих стран. В статье предложен метод расчета для оценки возможности прогрессирующего разрушения, основанный на предположении, что один или несколько сжатых элементов подвергаются повреждению и должны быть удалены из системы, обеспечивающей ее жесткость и геометрическую неизменность. Основным базовым положением метода является гипотеза образования в плите перекрытия линии пластических шарниров, которая может быть описана с помощью кривой Безье. Оценка возможности прогрессирующего разрушения производится энергетическим критерием на основе сравнения работ внутренних и внешних сил на возможных перемещениях системы, при таких условиях являющейся геометрически изменяемой. Предложенный метод является продуктивным и экономичным по сравнению с существующими методами, использующими сложные математические модели и программные комплексы. Используемые методики базируются на стандартах, гармонизированных с соответствующей методической и нормативной базой Евросоюза, и согласуются с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов, апробированы, обсуждены и признаны научным сообществом и входят в основную базу литературных ссылок и цитирования специалистами данной отрасли.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, предел огнестойкости, предельное состояние элемента конструкции, класс огнестойкости, максимальный уровень напряжения, элемент конструкции, приведенный поперечное сечение, противопожарная стена.

Annotation. During the fire safety analysis of building structures besides evaluation of their fire resistance, the limits of spreading of fire, fire hazards parameters and other fire and technical characteristics, the probability of progressive collapse of building structures due to their individual elements destroying should be considered. Considering the uniqueness, massiveness and cost of reinforced concrete and other buildings structures, their natural tests are ineffective, since they contemplate manufacturing two samples of structures in compliance with all technologies. In the conditions of progressive collapse of structures, socio-economic losses are becoming the largest scale. An assessment

of the possibility of progressive collapse is possible only with the use of a computational approach. This situation necessitates a calculation to assess the progressive destruction possibility of buildings and structures, which is fixed in the building codes of many countries. The article proposes a calculation method for assessing the possibility of progressive collapse, which is based on the assumption that one or more compressed elements are damaged and must be removed from the system, which ensures its rigidity and geometric constancy. The basic principle of the method is the hypothesis of the formation of a line of plastic hinges in the floor slab, which can be explained using a Bezier curve. The assessment of the possibility of progressive collapse is carried out by determination the energy criterion on the basis of comparing works of internal and external forces on possible displacements of the system, which under such conditions is geometrically variable. The proposed method is productive and economical in comparison with existing methods that involve complex mathematical models and software packages. These methods are based on standards harmonized with the relevant methodological and regulatory framework of the united Europe, and also consistent with the research results of domestic and foreign authors, which are tested, discussed and recognized by the scientific community and are included in the main base of literary references and are cited by experts in this industry.

Keywords: progressive collapse, fire resistance limit, limit state of structural element, fire resistance class, maximum stress level, structural element, given cross section, fire wall.

Стаття надійшла до редакції 20.07.2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук С.П. Мінєєвим