

УДК 624.012

*А. В. Швиденко, канд. техн. наук, доцент, С. В. Поздєєв, д-р техн. наук, професор,
О. М. Землянський, канд. техн. наук, доцент, А. Ю. Новгородченко,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТІ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬ УНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ

При настанні прогресуючого руйнування конструкцій будівель, соціально-економічні втрати стають найбільш масштабними, особливо коли будівлі мають високий ступінь відповідальності. Для таких будівель є унормована вимога проводити розрахункову оцінку можливості прогресуючого руйнування. У статті сформульовані основні положення методу розрахунку щодо оцінки можливості прогресуючого руйнування, за умови відмови одного або декількох стиснутих елементів, і які мають бути вилучені із загальної конструктивної системи каркасу даної будівлі, що складається із сталевих балок, трубобетонних та залізобетонних колон. Основним базовим положенням методу є гіпотеза утворення у балках та колонах пластичних шарнірів. Оцінка можливості прогресуючого руйнування відбувається за енергетичним критерієм на основі порівняння робіт внутрішніх та зовнішніх сил на можливих переміщеннях системи, що за таких умов є геометрично змінною. Запропонований метод є продуктивним і економічним у порівнянні із існуючими методами, які залучають складні математичні моделі та програмні комплекси. Коли руйнування одного або декількох елементів конструкцій призводить до послідовного обвалення інших елементів рівень соціально-економічних втрат досягає максимального рівня оскільки при цьому частково або повністю руйнується вся будівля. Запобігання прогресуючому руйнуванню будівель є унормованою вимогою розрахункової оцінки такої можливості, і якщо її результат є негативним, досліджувані конструкції мають бути відповідним чином підсилені. Для проведення розрахункової оцінки є доцільним залучення сучасних розрахункових методів прогнозування можливості прогресуючого руйнування, що мали б поєднувати достатню точність та теоретичну обґрунтованість із відносною простотою реалізації та економічністю обчислювальних операцій. Тож, розробка та удосконалення таких методів є актуальною задачею.

Ключові слова: прогресуюче руйнування, розрахунковий метод, граничний момент.

Постановка проблеми.

Статистичні дані про пожежі та нещасні випадки на пожежах показують, що руйнування несучих будівельних конструкцій внаслідок пожежі залишаються одним з найбільш небезпечних чинників, як це показано у роботах [1 – 3]. Неможливо забути трагічні події, які сталися вранці 11 вересня 2001 року чотири групи терористів-смертників захопили чотири пасажирські авіалайнери, два з них спрямували у північну та південну вежі комплексу Всесвітнього торгового центру в Нью-Йорку. В середині будівель спалахнула пожежа, вогонь розплавив несучі сталеві конструкції, що викликало повне

руйнування споруд. Протягом години і 42 хвилин обидві 110-поверхові вежі-близнюки обвалилися. Сміття зруйнованих будівель й пожежа викликали частковий або повний обвал понад десятка прилеглих споруд, зокрема 47-поверхової вежі 7 Всесвітнього торгового центру. Унаслідок обвалу загинуло 2 996 осіб, більше 6 000 осіб отримали поранення. Таким чином, теракт став найбільшим в історії за кількістю жертв, інфраструктура зазнала збитків на суму не менше 10 млрд доларів США. Тому, для запобігання таких масштабних обвалів є актуальним питання удосконалення методу розрахункової оцінки можливості прогресуючого руйнування будівель [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними досліджень, наведених у роботах [5, 6], властивостями достатньої точності, теоретичної обґрунтованості, простоти реалізації та економічності обчислювальних операцій серед методів інженерного оцінювання можливості прогресуючого руйнування будівель та споруд можна виділити кінематичний метод. Даний метод застосований на визначенні роботи внутрішніх сил (W) і зовнішніх навантажень (U) на можливих переміщеннях розглянутого механізму, на який перетворюється статична система, для кожного з наперед прийнятих механізмів прогресуючого руйнування. Умовою зберігання статичної системи опору до прогресуючого руйнування при цьому є виконання нерівності:

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

Механізм руйнування каркасу будівлі за умов теплового впливу пожежі допускає, що зруйнована колона видаляється повністю 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 він не може бути застосований до даного типу каркасу, крім того, обмежене обґрунтування величин моментів, які мають бути прикладені у пластичних шарнірах колон.

Інший підхід до розрахункового прогнозування прогресуючого руйнування описаний та ефективно застосований у дослідженнях [7]. 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 і завдання дослідження.

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 пластичних шарнірів у балках та колонах, що обмежують рухомі частини даної геометрично змінної системи як підґрунтя удосконаленого кінематичного методу розрахунку щодо прогнозування прогресуючого руйнування у будівлях із каркасами, що складаються із сталезалізобетонних та залізобетонних колон, а також сталевих балок. Для досягнення мети поставлені такі завдання:

- розробити 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 каркаси будівель, зведених на основі сталевих балок, залізобетонних та трубобетонних колон;

- на основі запропонованого математичного апарату удосконалити кінематичний розрахунковий метод прогнозування можливості прогресуючого руйнування для каркасів будівель на основі сталевих балок, залізобетонних та трубобетонних колон.

Виклад основного матеріалу. Для розгляду прогресуючого руйнування за прийнятих припущень застосовується розрахункова схема механізму руйнування першого типу, яка наведена на рис. 1, 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. 2. Дані схеми відповідають кінематичному розрахунку частини будівлі із одним елементом, для якого допускається руйнування унаслідок пожежі.

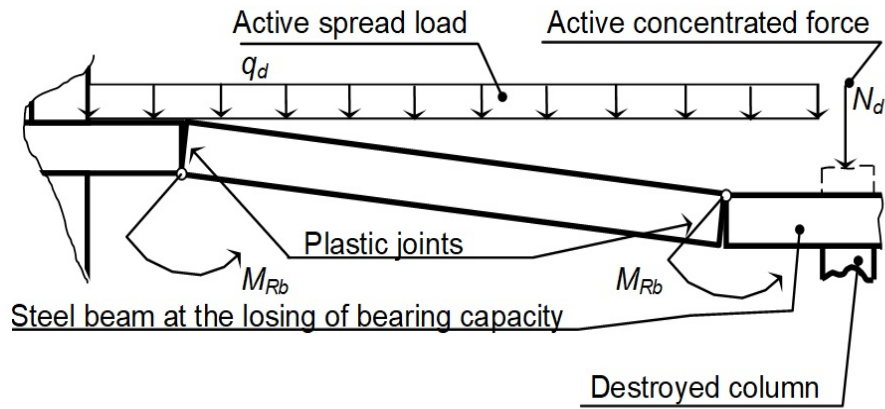


Рисунок 1 – Розрахункова схема дії внутрішніх сил для механізму руйнування першого типу

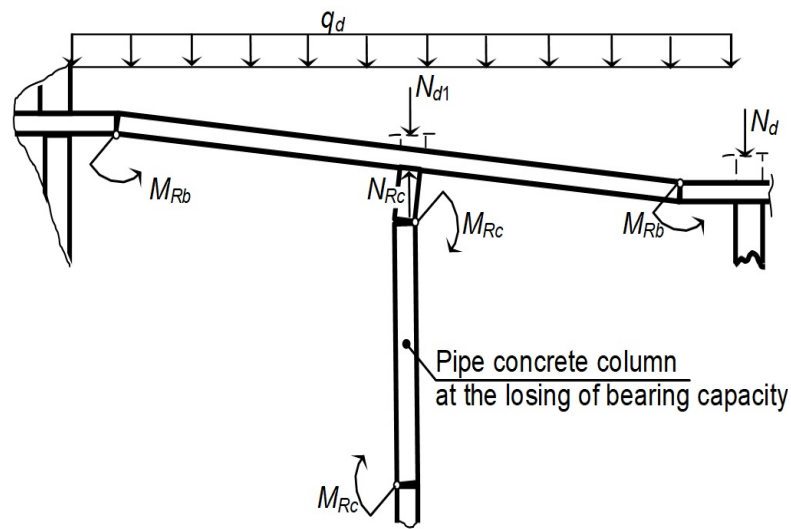


Рисунок 2 – Розрахункова схема дії внутрішніх сил для механізму руйнування другого типу

На рис. 3 та рис. 4 наведені схеми визначення віртуальних переміщень для визначення віртуальних внутрішніх робіт у кінематичних схемах структур згідно із рис. 1 та рис. 2.

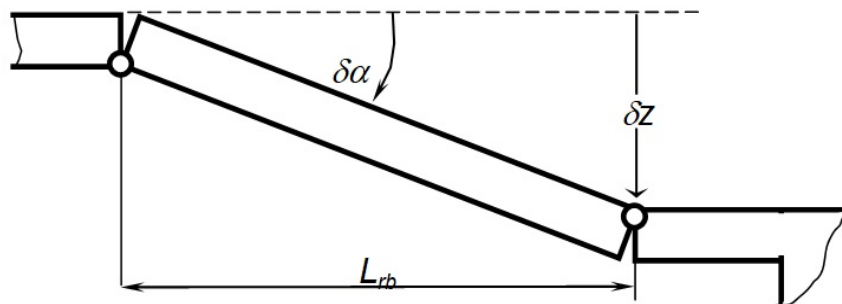


Рисунок 3 – Розрахункова схема визначення віртуальних переміщень для механізму руйнування першого типу

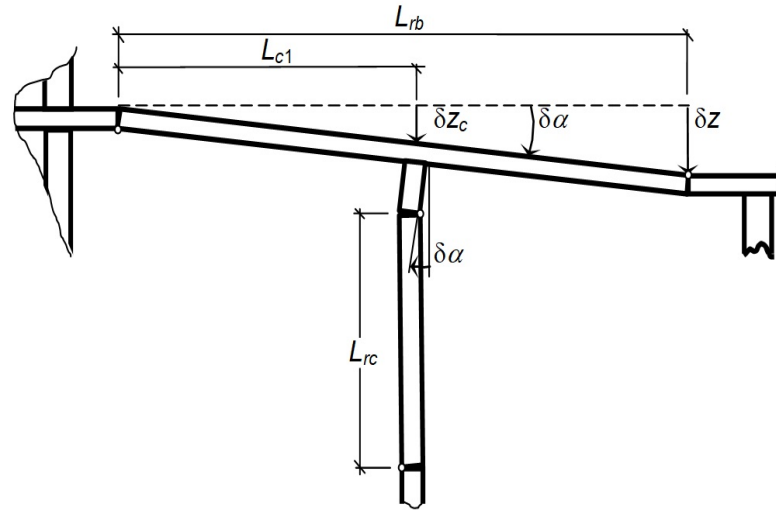


Рисунок 4 – Розрахункова схема визначення віртуальних переміщень для механізму руйнування другого типу

За наведеними розрахунковими схемами визначається робота внутрішніх сил на можливому переміщенні δz для першої розрахункової схеми (див. рис. 1 та рис. 3) з використанням виразу:

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

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

Робота внутрішніх сил на можливому переміщенні δz для другої розрахункової схеми (див. рис. 2 та рис. 4) з використанням виразу:

$$W = \frac{2M_{Rb} + M_{Rc}}{L_{rb}} \delta z + \frac{M_{Rc} L_j}{L_{rc} L_{rb}} \delta z + N_{Rc} \frac{L_{c1}}{L_{rb}} \delta z, \quad (3)$$

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. 1 та рис. 3) з використанням виразу:

$$U = 0.5q_d L_{rb} \delta z + N_d \delta z. \quad (4)$$

Робота зовнішніх сил на можливому переміщенні δz для другої кінематичної схеми руйнування (див. рис. 2 та рис. 4) з використанням виразу:

$$U = 0.5q_d L_{rb} \delta z + N_d \delta z + N_{d1} \frac{L_{c1}}{L_{rb}} \delta z. \quad (5)$$

Для розрахунку граничних моментів та граничних сил у колонах застосовується метод граничних станів [8], що схематично зображений на рис. 5.

Розрахунок виконується із застосуванням схем деформування фрагменту при поступовому переміщенні нейтральної вісі вздовж небезпечного перерізу досліджуваного фрагменту колони [8]. На рис. 5 наведені положення нейтральної вісі і епюри деформацій відповідних до цього положення.

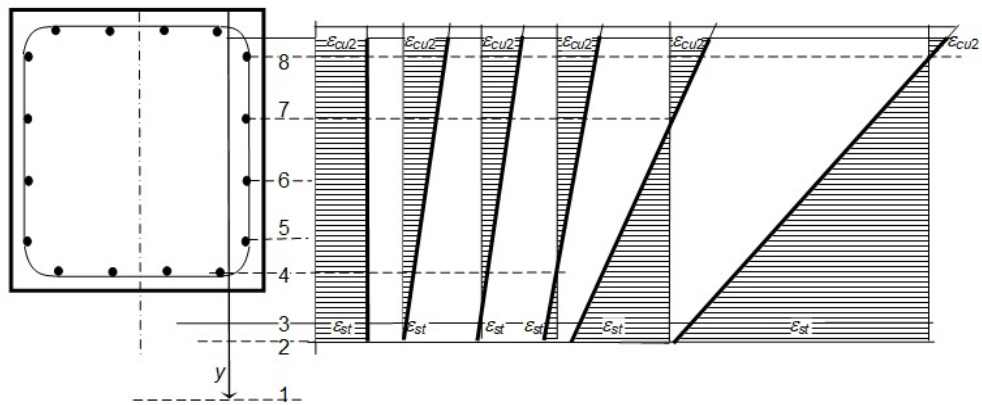


Рисунок 5 – Положення нейтральної вісі та відповідні йому епюри деформацій у небезпечному перерізі колони.

Користуючись схемою для визначення граничних зусиль, наведеною на рис. 5 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. Означені графіки наведені на рис. 6.

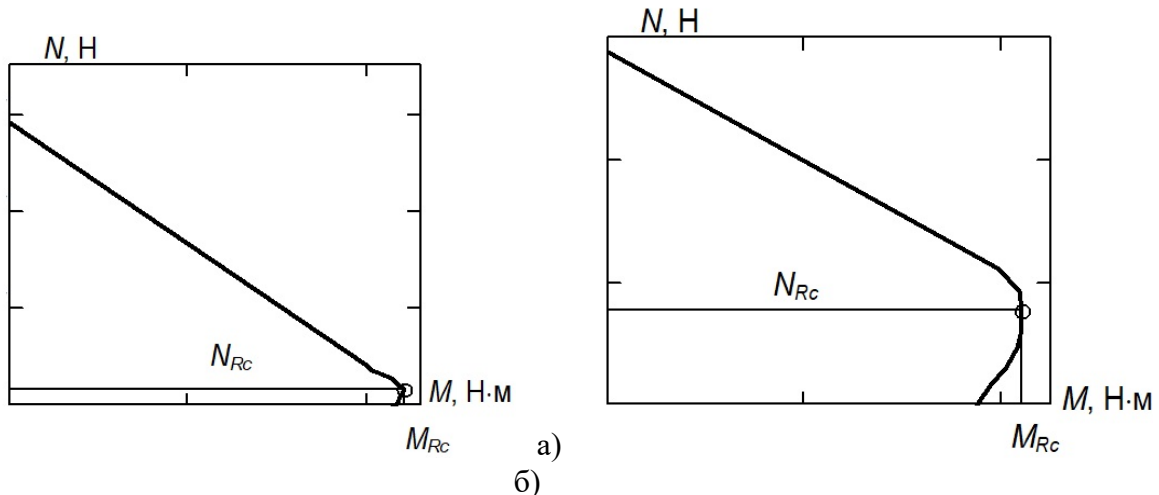


Рисунок 6 – Діаграма «граничний момент – гранична сила»: а) для трубобетонної колони; б) для залізобетонної колони

Граничні моменти сталевих балок визначаються за формулою [9]:

$$M_{Rb} = f_y W_x \gamma_{M,0}^{-1} \quad (6)$$

де W_x – момент опору перерізу балки; $\gamma_{M,0}$ – коефіцієнт надійності відповідних властивостей матеріалу при пожежі (за [9] потрібно приймати рівним 1,0)

Для проведення розрахунку щодо визначення можливості прогресуючого руйнування будівлі внаслідок пожежі мають бути виконані наступні процедури. Визначається одна або група колон

(діафрагм) що вилучаються із схеми жорсткості будівлі як зруйновані внаслідок пожежі. Також 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. Використовуючи

формули (2) та (3) 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 (4) та (5), визначається сумарна можлива робота зовнішніх сил. 6. Перевіряється виконання умови (1) та робиться висновок про можливість прогресивного руйнування будівлі внаслідок пожежі.

Висновки. 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 в аварійному стані унаслідок дії пожежі на каркаси будівель, зведених на основі сталевих балок, залізобетонних та труобетонних колон; - на основі запропонованого математичного апарату удосконалений кінематичний розрахунковий метод прогнозування можливості прогресуючого руйнування для каркасів будівель на основі сталевих балок, залізобетонних та труобетонних колон.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

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/mateconf/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/mateconf/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, No.3, (2018), pp.21-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792>.

4. https://uk.wikipedia.org/wiki/Терористичний_акт_11_вересня_2001_року.

5. Pozdieiev S., O. Nekora, Kryshstal T., Zazhoma V. Sidnei S. Method of the calculated

estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire. (2018) MATEC Web of Conferences, 230, art. no. 02026, DOI: 10.1051/mateconf/201823002026.

6. Shapiro G.I., Eisman Yu.A., Zalesov A.S., Rekomendacii po zachite monolitnyh zdaniy ot progressiruyuchego obrusheniya. Moskomarchitecture. Moscow. (2005). 28 p.

7. Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA, (2005). 680 p.

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., 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/mateconf/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/mateconf/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, No.3, (2018), pp.21-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131792>.

4. https://uk.wikipedia.org/wiki/Терористичний_акт_11_вересня_2001_року.

5. Pozdieiev S., O. Nekora, Kryshstal T., Zazhoma V. Sidnei S. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire. (2018) MATEC Web of Conferences, 230, art. no. 02026, DOI: 10.1051/mateconf/201823002026.

6. Shapiro G.I., Eisman Yu.A., Zalesov A.S., Rekomendacii po zachite monolitnyh zdaniy ot progressiruyuchego obrusheniya. Moskomarchitecture. Moscow. (2005). 28 p.

7. Hallquist, J.O.: LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA, (2005). 680 p.

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]

А. В. Швыденко, канд. техн. наук, доцент, С. В. Поздеев, д-р техн. наук, профессор, А. Н. Землянский, канд. техн. наук, доцент, А. Ю. Новгородченко, Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ ПРИ ПОЖАРЕ

При наступлении прогрессирующего разрушения конструкций зданий социально-экономические потери становятся самыми масштабными, особенно когда здания имеют высокую степень ответственности. Для таких зданий существует нормированное требование проводить расчетную оценку возможности прогрессирующего разрушения. В статье сформулированы основные положения метода расчета по оценке возможности прогрессирующего разрушения, при условии отказа одного или нескольких сжатых элементов, и которые должны быть изъяты из общей конструктивной системы каркаса данного здания, состоящего из стальных балок, трубобетонных и железобетонных колонн. Основным базовым положением метода является гипотеза образования в балках и колоннах пластических шарниров. Оценка возможности прогрессирующего разрушения происходит энергетическим

критерием на основе сравнения работ внутренних и внешних сил на возможных перемещениях системы, при таких условиях является геометрически изменяемой. Предложенный метод является продуктивным и экономичным в сравнении с существующими методами, которые привлекают сложные математические модели и программные комплексы. Когда разрушение одного или нескольких элементов конструкций приводит к последовательному обрушению других элементов, уровень социально-экономических потерь достигает максимального уровня, поскольку при этом частично или полностью разрушается все здание. Для предотвращения прогрессирующего разрушения зданий является нормированным требованием расчетной оценки такой возможности, и если ее результат является отрицательным, исследуемые конструкции должны быть соответствующим образом

усилены. Для проведения расчетной оценки целесообразно привлечение современных расчетных методов прогнозирования возможности прогрессирующего разрушения, которые должны сочетать достаточную точность и теоретическую обоснованность с относительной

простотой реализации и экономичностью вычислительных операций. Поэтому, разработка и совершенствование таких методов является актуальной задачей.

***Ключевые слова:** прогрессирующее разрушение, расчетный метод, предельный момент.*

*A. V. Shvydenko, PhD in technical sciences, docent,
S. V. Pozdieiev, doctor of technical sciences, professor,
O. M. Zemlianskyi PhD in technical sciences, docent, A. Yu. Novhorodchenko,
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of
National University of Civil Defence of Ukraine*

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF CALCULATIONAL EVALUATION OF POSSIBILITY OF PROGRESSIVE DESTRUCTION OF BUILDINGS AS A RESULT OF FIRE

With the progressive demolition of building structures, socioeconomic losses become most widespread, especially when buildings have a high degree of responsibility. For such buildings there is a standardized requirement to carry out a calculated assessment of the possibility of progressive destruction. The article formulates the main provisions of the method of calculation for the assessment of the possibility of progressive destruction, with the failure of one or more compressed elements, and which must be removed from the general structural system of the frame of this building, consisting of steel beams, concrete and reinforced concrete columns. The basic principle of the method is the hypothesis of the formation of beams and columns of plastic hinges. Assessment of the possibility of progressive destruction is based on the energy criterion based on a comparison of the work of internal and external forces on the possible displacements of the system, which is geometrically variable in such conditions. The proposed method is productive and economical compared to existing methods that involve

complex mathematical models and software complexes. When the destruction of one or more structural elements leads to the consistent collapse of the other elements, the level of socio-economic losses reaches the maximum point, since the entire building is partially or completely destroyed. In order to prevent the progressive destruction of buildings, there exists a standardized requirement to calculate such a possibility, and if its result is negative, the investigated structures should be appropriately reinforced. It is advisable to use advanced computational methods for predicting the possibility of progressive destruction, which should combine sufficient accuracy and theoretical validity with the relative simplicity of implementation and cost-effectiveness of computational operations. Therefore, the development and improvement of such methods is an urgent task.

***Keywords:** progressive fracture, computational method, limiting moment.*