

КОЛЧАНОВ АНДРІЙ

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

<https://orcid.org/0009-0001-7813-2965>e-mail: andrii.kolchanov@kname.edu.ua

РОЗРАХУНОК ПАНЕЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ ПРИ ПРОГРЕСУЮЧОМУ РУЙНУВАННІ

Стаття пропонує розрахункові моделі збереження просторової цілісності системи під впливом руйнівних чинників. Методологія базується на просторовому чисельному моделюванні фізичної та геометричної нелінійності об'єкта. Розрахунки виконані через скінченно-елементний підхід для відтворення змін напружено-деформованого стану. Практичне значення роботи полягає у розробленні рішень для посилення панельних споруд. Запропоновані методи модернізації вузлів забезпечують зниження напружень у небезпечних перерізах. Оптимізація схеми навантаження дозволяє ефективно локалізувати пошкодження на ранніх етапах. Результати аналізу стануть основою для проєктування нових об'єктів та реконструкції наявного фонду. Наукова новизна полягає у комплексному врахуванні нелінійної поведінки залізобетонних елементів. Кількісне визначення параметрів локалізації дефектів підвищує точність прогнозування аварійних ситуацій. Дослідження доводить ефективність впровадження дублюючих зв'язків для запобігання лавиноподібному обваленню. Застосування уточнених моделей розширює можливості оцінювання залишкового ресурсу будівель. Сформований підхід оптимізує витрати на конструктивні заходи безпеки.

Ключові слова: прогресуюче руйнування, панельні будівлі, перерозподіл зусиль, скінченно-елементне моделювання, нелінійний аналіз, конструктивне підсилення, структурна стійкість.

KOLCHANOV ANDRII

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

ANALYSIS OF PANEL BUILDINGS UNDER PROGRESSIVE COLLAPSE

The article examines the conditions for maintaining the spatial integrity of a structural system under destructive impacts. The methodology is based on spatial numerical modeling that incorporates both physical and geometric nonlinearity of the object. The calculations are performed using the finite element approach to reproduce changes in the stress-strain state. The scenarios involve the instantaneous removal of vertical supports in different zones of the building plan. The evaluation of results relies on a system of generalized criteria that reflect the ratio of applied loads to structural capacity. The algorithm accounts for the level of stress concentration and the degree of localization of destructive processes. The obtained results demonstrate a non-uniform redistribution of internal forces between adjacent panels. Critical zones emerge in connection joints and neighboring structural components. Internal damage leads to a more intensive increase in displacements compared to corner scenarios. The observed development of plastic deformations determines the subsequent failure mechanism of the system. The presence of additional ties alters the trajectories of force transfer within the structural framework. Increasing joint stiffness reduces the risk of transition to global instability. The practical significance of the study lies in the development of engineering solutions for strengthening panel structures. The proposed methods for joint enhancement ensure a reduction of stresses in critical sections. Optimization of the load transfer scheme enables effective localization of damage at early stages. The results provide a basis for the design of new structures and the reconstruction of existing buildings. The scientific novelty consists in the comprehensive consideration of the nonlinear behavior of reinforced concrete elements. The quantitative identification of damage localization parameters improves the accuracy of predicting failure scenarios. The study confirms the effectiveness of introducing redundant ties to prevent progressive collapse. The application of refined models expands the capabilities for assessing the residual capacity of buildings. The developed approach reduces the cost of structural safety measures while maintaining reliability.

Keywords: progressive collapse, panel buildings, load redistribution, finite element modeling, nonlinear analysis, structural strengthening, structural stability.

Стаття надійшла до редакції / Received 16.05.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Колчанов Андрій

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Значні масштаби пошкоджень житлової забудови внаслідок аварійних ситуацій та воєнних дій зумовлюють критичну необхідність перегляду концепції надійності великопанельних будівель. Суттєвий масив наявного житлового фонду було зведено за нормативами, які не передбачали сценаріїв раптового виходу з ладу окремих несучих конструкцій. Це створює передумови для виникнення прогресуючого (непропорційного) руйнування навіть за умов локального впливу. Результати натурних обстежень свідчать, що найбільш вразливими ділянками є вузли з'єднань та стики панелей із низьким рівнем деформативності. Втрата експлуатаційної

придатності одного конструктивного елемента ініціює лавиноподібний перерозподіл внутрішніх зусиль за вертикальним контуром будівлі.

Наукова та практична актуальність роботи обґрунтована потребою у створенні нових інженерних методик, спрямованих на забезпечення живучості панельних систем у позапроектних ситуаціях. Оскільки традиційні розрахункові методи не дозволяють повноцінно ідентифікувати механізми руйнування на початкових етапах, основна проблема дослідження полягає у відсутності уніфікованого підходу до оцінювання резервів тримальної здатності та розроблення конструктивних заходів для локалізації прогресуючого обвалення.

Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз накопичених досліджень демонструє різноспрямований розвиток підходів до оцінювання прогресуючого руйнування будівель. У роботі Вабіщевича М. О. та співавторів [2] встановлено, що врахування фізичної нелінійності змінює характер деформацій та сприяє концентрації напружень у критичних елементах. Методичні підходи до оцінювання прогресуючого обвалення узагальнено Отрошем Ю. А. [6], де визначено ключові етапи розрахунку та запропоновано алгоритми їх реалізації. Проблеми точності чисельних моделей досліджено Радкевичем А. В. [7], який виявив залежність результатів від вибору розрахункової схеми та способу моделювання пошкодження. Водночас результати Берчуна Я. О. [1] показують перспективність застосування інтелектуальних методів для оцінювання технічного стану будівель після пошкоджень. Зарубіжні дослідження деталізують механізми руйнування. У праці Го Юйсу та співавторів [10] застосовано чисельне моделювання для прогнозування розвитку руйнування, що дозволяє оцінити поведінку конструкції у часі. Килиджер С. та Килиджер С. Т. [11] розглядають використання методу tie-force для забезпечення зв'язності конструкцій і підвищення їх надійності.

Питання моделювання залізобетонних каркасів розглянуто Петроне Ф., Шань Л., Куннат С. К. [14], де запропоновано підхід до відтворення складних сценаріїв руйнування. Практичні аспекти захисту великопанельних будівель досліджено Сечковським Я. та Шульцем Я. [15], які обґрунтовують ефективність конструктивного підсилення. Нормативну базу формує ДСТУ 9294:2024 [4], який встановлює вимоги до перевірки будівель на стійкість до непропорційного обвалення. Узагальнення міжнародного досвіду виконано Фесуном І. К., Вабіщевичем М. О. та Лукашевичем Д. Ю. [8], де проаналізовано типові сценарії руйнування та підходи до їх обмеження. Наведені праці формують методичну основу дослідження. Проте питання інтеграції розрахункових моделей із інженерними заходами підсилення залишається недостатньо опрацьованим.

Формулювання цілей статті

Мета статті – провести удосконалення розрахункових інженерних методів оцінювання та підвищення стійкості панельних будівель при факті прогресуючого руйнування.

Виклад основного матеріалу

Розрахункову модель панельної будівлі формують через просторове представлення несучої системи з урахуванням змінної жорсткості при локальному пошкодженні. На початковому етапі задають геометрію панелей, координати вузлів і конфігурацію стиків. Далі вводять матеріальні характеристики бетону, арматури та контактних зон, які змінюються при досягненні граничних деформацій. Під час дискретизації панелі представляють оболонковими елементами, тоді як стики моделюють окремими нелінійними зв'язками. Вузли характеризуються обмеженою жорсткістю та здатністю до ластичного деформування. Зі збільшенням переміщень у стиках відбувається поступове зниження жорсткості, що змінює розподіл внутрішніх зусиль [6]. Кількісні параметри сформованої моделі наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри просторової скінченно-елементної моделі панельної будівлі з урахуванням нелінійності

№	Тип системи	n , поверхів	l_x , м	l_y , м	l_w , мм	t_s , мм	E_c , МПа	f_c , МПа	ρ_s , %	k_j , кН/мм	μ_j	Тип нелінійності
1	Поперечна	9	3,2	6,0	160	140	30000	25	0,8	12000	0,15	фізична
2	Поперечна	12	3,6	6,4	180	160	31000	28	0,9	13500	0,18	комбінована
3	Просторова	10	6,0	6,0	200	180	32000	30	1,0	15000	0,20	геометрична
4	Просторова	14	6,4	6,4	220	200	33000	32	1,1	16500	0,22	комбінована
5	Комбінована	8	4,8	6,0	180	160	30000	26	0,85	12500	0,17	фізична
6	Комбінована	16	5,4	6,4	200	180	32000	30	1,05	15500	0,21	комбінована
7	Поперечна	11	3,0	5,8	160	140	29000	24	0,75	11000	0,14	фізична
8	Просторова	13	6,2	6,2	210	190	32500	31	1,08	16000	0,23	геометрична

Джерело: сформовано автором за даними [14, 16]

Після задання геометрії формується система рівнянь руху. Вона враховує інерційні сили, демпфування та зміну жорсткості під час деформування:

$$M \cdot u(t) + C \cdot \dot{u}(t) + K(u, t) \cdot u(t) = P(t). \quad (1)$$

де M – матриця мас;

C – матриця демпфування;

$K(u, t)$ – матриця жорсткості;

$u(t)$ – переміщення;

$P(t)$ – навантаження.

Змінна жорсткість системи визначається через інтегрування по об'єму елементів:

$$K(u) = \sum_{e=1}^n \int_{V_e} B_e^T \cdot D_e(u) \cdot B_e dV. \quad (2)$$

де B_e – матриця деформацій;

$D_e(u)$ – матеріальні характеристики;

V_e – об'єм елемента.

Зазначена залежність використовується ітераційно. На кожному кроці уточнюється матриця жорсткості, що відображає перехід від пружної до пластичної роботи. Наступним кроком вводиться аварійний сценарій [5]. Видалення несучого елемента реалізується через зміну навантажувальної схеми:

$$P'(t) = P(t) - P_{rem}(t). \quad (3)$$

де $P_{rem}(t)$ – навантаження, яке передавалося видаленим елементом.

Після видалення виникає короткочасний динамічний процес. Його оцінюють через енергетичний коефіцієнт:

$$\gamma_d = 1 + \sqrt{\frac{2E_k}{E_s}}. \quad (4)$$

де E_k – кінетична енергія;

E_s – енергія деформації.

Результати розрахунків для різних сценаріїв локального руйнування наведені у таблиці 2

Таблиця 2

Параметри напружено-деформованого стану при різних сценаріях локального руйнування

№	Сценарій	Рівень	w_{max} , мм	θ , рад	σ_{max} , МПа	τ_{max} , МПа	N , Кн	M_x , Кн·м	Q , Кн	DCR_e	DCR_j
1	Кутовий	1	18	0,0021	12,5	1,8	420	85	65	0,72	0,81
2	Кутовий	5	24	0,0034	15,2	2,3	510	110	72	0,85	0,93
3	Крайовий	3	21	0,0028	14,1	2,0	470	95	68	0,78	0,88
4	Крайовий	7	27	0,0039	16,8	2,6	550	125	75	0,91	0,97
5	Внутрішній	2	16	0,0020	11,9	1,6	390	80	60	0,69	0,75
6	Внутрішній	6	29	0,0045	18,5	2,9	600	140	82	0,95	1,02
7	Внутрішній	9	34	0,0052	20,1	3,2	650	155	88	1,08	1,15
8	Внутрішній	10	38	0,0060	22,3	3,6	710	170	95	1,12	1,21

Джерело: сформовано автором за даними [8, 11, 16]

Аналіз показує зростання переміщень при внутрішньому видаленні елементів. При цьому відбувається концентрація напружень у стиках і прилеглих панелях (рис. 1).

Для кількісної оцінки використовується критерій:

$$DCR = \frac{S_d}{R_d}. \quad (5)$$

де S_d – внутрішнє зусилля;

R_d – несуча здатність.

Напружений стан панелей визначається з урахуванням комбінованого навантаження:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x y}{I_x} + \frac{M_y x}{I_y}. \quad (6)$$

де N – поздовжня сила;

M_x, M_y – моменти.

Стики перевіряються за умовою міцності:

$$N \leq A_s f_y + A_c f_c. \quad (7)$$

де A_s – площа арматури;

A_c – площа бетону.

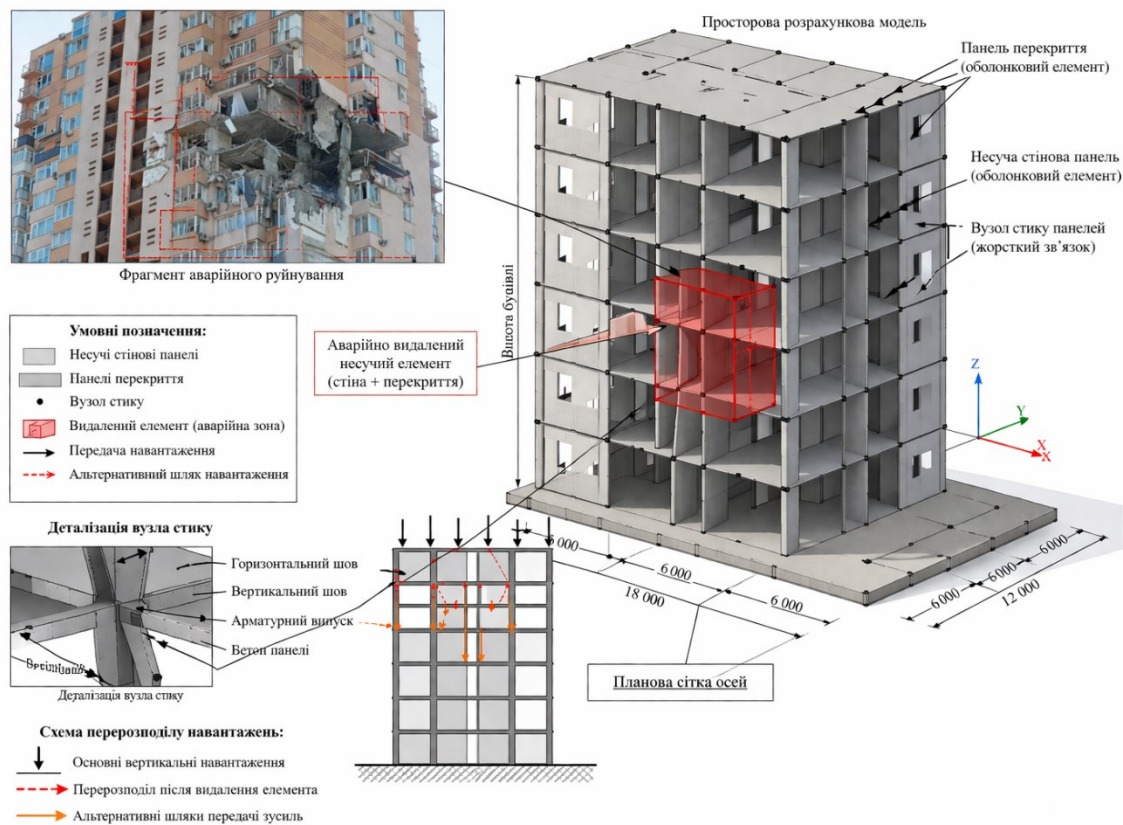


Рис. 1. Просторова розрахункова схема панельної будівлі з позначенням аварійного видалення елемента

Джерело: побудовано автором в середовищі Claude Sonnet 4.6

Виявлені перевищення граничних значень потребують корекції конструктивної схеми. Для цього вводяться заходи підсилення, параметри яких наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Ефективність конструктивного підсилення за критеріями жорсткості, деформацій і несучої здатності

№	Тип підсилення	ΔK , %	ΔM , %	Δw , %	$\Delta \theta$, %	$\Delta \sigma$, %	ΔDCR_e	ΔDCR_j	η_{eff}
1	Додаткова арматура	+15	-10	-12	-9	-8	-0,10	-0,08	0,78
2	Посилення стиків	+20	-14	-18	-15	-12	-0,14	-0,12	0,84
3	Металеві зв'язки	+25	-18	-22	-19	-16	-0,18	-0,15	0,89
4	Збільшення товщини	+10	-7	-9	-6	-5	-0,07	-0,06	0,72
5	Композитні елементи	+18	-13	-15	-12	-10	-0,12	-0,10	0,81
6	Діафрагми жорсткості	+30	-22	-26	-21	-19	-0,21	-0,18	0,93
7	Перерозподіл навантажень	+12	-9	-11	-8	-7	-0,09	-0,07	0,76
8	Комбіноване підсилення	+35	-28	-30	-25	-23	-0,25	-0,21	0,96
9	Підсилення вузлів	+22	-16	-19	-14	-13	-0,16	-0,14	0,87
10	Заміна стиків	+28	-20	-24	-18	-17	-0,20	-0,17	0,91

Джерело: сформовано автором за даними [8, 16]

Після внесення змін сформована модель підлягає перерахуванню. У результаті формується новий розподіл зусиль із зменшеними локальними концентраціями. Встановлено, що ефективність підсилення залежить від положення пошкодженого елемента та жорсткості суміжних конструкцій. Проведення розрахунку прогресуючого руйнування панельної будівлі реалізують через послідовну зміну розрахункової схеми з фіксацією перерозподілу зусиль після втрати несучого елемента. На початковому етапі формується базова модель із заданими навантаженнями та граничними умовами [12].

Далі виконується локальне видалення панелі або стіни, після чого система переходить у новий стан рівноваги. У цей момент визначається не лише новий розподіл переміщень, а й характер перерозподілу внутрішніх сил між суміжними елементами. З урахуванням просторової роботи системи рівняння рівноваги доцільно записати у варіаційній формі, що дозволяє відобразити зміну напруженого стану після пошкодження:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \cdot \sigma dV = \delta \mathbf{u}^T \cdot (\mathbf{F}_{ext} - \mathbf{F}_{rem}). \quad (10)$$

де $\delta \varepsilon$ – варіації деформацій;

σ – напруження;
 δ_u – варіації переміщень;
 F_{ext} – зовнішні навантаження;
 F_{rem} – зусилля видаленого елемента.

Такий запис дає змогу оцінити зміну внутрішніх сил без прямого переходу до спрощених статичних схем. Після формування рівняння визначається модифікована жорсткість системи, яка враховує втрату окремих елементів і деградацію стиків.

$$\mathbf{K}^* = \int_V \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D}(u) \cdot \mathbf{B} dV - \sum_{i=1}^m \mathbf{K}_i. \quad (8)$$

де $\mathbf{B}$ – матриця деформацій;
 $\mathbf{D}(u)$ – нелінійні властивості матеріалу;
 $\mathbf{K}_i$ – внесок видалених елементів.

Зменшення жорсткості не є рівномірним. Найбільша деградація спостерігається у зонах стиків і прилеглих панелях. Саме тому розрахунок виконується ітераційно з уточненням матриці жорсткості [1]. Після визначення нової матриці виконується обчислення переміщень:

$$\mathbf{u}^* = (\mathbf{K}^*)^{-1} \cdot \mathbf{F}^*. \quad (9)$$

де $\mathbf{F}^*$ – змінений вектор навантажень.

Отримані переміщення відображають початкову стадію перерозподілу. Вони безпосередньо впливають на формування внутрішніх зусиль, які визначаються інтегруванням напружень по площі перерізу:

$$N = \int_A \sigma_n dA, M = \int_A \sigma_n \cdot z dA, Q = \int_A \tau dA. \quad (11)$$

де σ_n – нормальні напруження;
 τ – дотичні напруження;
 z – координата.

Результати обчислень систематизуються для різних сценаріїв локального руйнування. Це дозволяє оцінити залежність між положенням видаленого елемента та інтенсивністю перерозподілу зусиль. Відповідні значення наведені у таблиці 4

Таблиця 4

Параметри напружено-деформованого стану при альтернативному перерозподілі навантажень

№	Сценарій	Поверх	w_{max} , мм	φ , рад	σ_n , МПа	τ , МПа	N , кН	M , кН·м	Q , кН	ΔK , %	DCR_p	DCR_j
1	Кутовий	1	19	0,0022	12,3	1,7	410	82	62	-8	0,74	0,79
2	Кутовий	4	23	0,0030	14,8	2,1	495	105	70	-12	0,83	0,91
3	Крайовий	3	21	0,0027	13,9	2,0	470	96	68	-10	0,80	0,87
4	Крайовий	6	28	0,0041	17,1	2,7	560	130	77	-15	0,93	0,99
5	Внутрішній	2	17	0,0021	12,0	1,6	400	84	63	-7	0,70	0,76
6	Внутрішній	5	30	0,0047	18,7	3,0	610	142	84	-18	0,98	1,04
7	Внутрішній	8	35	0,0054	20,5	3,3	670	158	90	-21	1,10	1,18
8	Внутрішній	10	39	0,0062	22,9	3,7	730	175	96	-24	1,16	1,25

Джерело: сформовано автором за даними [11, 14]

Аналіз даних показує, що найбільш інтенсивний перерозподіл спостерігається при внутрішньому видаленні елементів. Зростання переміщень супроводжується збільшенням нормальних і дотичних напружень. Це призводить до перевищення граничних значень у стиках і панелях. Для оцінки працездатності конструкції використовується узагальнений критерій [3]:

$$DCR = \frac{\sqrt{N^2 + \alpha M^2 + \beta Q^2}}{R}. \quad (12)$$

де α, β – коефіцієнти взаємодії;
 R – гранична несуча здатність.

Оскільки стики працюють у складному напруженому стані, їхній опір визначається комбіновано:

$$R = \sqrt{(A_s f_y)^2 + (A_c f_c)^2}. \quad (13)$$

де A_s – площа арматури;
 A_c – площа бетону.

Зростання напружень супроводжується розвитком пластичних деформацій. Це явище враховується через залежність кута повороту:

$$\theta = \theta_y + \frac{M - M_y}{k_p}. \quad (14)$$

де θ_y – кут текучості;

k_p – пластична жорсткість.

Подальший розвиток руйнування оцінюється через енергетичний показник локалізації:

$$\eta = \frac{\int_{V_{dam}} \sigma \cdot \varepsilon dV}{\int_V \sigma \cdot \varepsilon dV}. \quad (15)$$

де V_{dam} – зона пошкодження.

Сформований показник має визначати межу переходу від локального пошкодження до глобального руйнування. Результати його обчислення наведені у таблиці 5

Таблиця 5

Параметри розвитку прогресуючого руйнування та локалізації пошкоджень

№	Зона	$V_{dam}, \text{м}^3$	η	ε_{max}	$\theta_{pl}, \text{рад}$	$\sigma_{eq}, \text{МПа}$	$\tau_{eq}, \text{МПа}$	$\Delta E, \%$	k_{red}	DCR
1	Кут	2,1	0,18	0,0012	0,0025	13,1	1,9	12	0,92	0,78
2	Край	2,8	0,24	0,0016	0,0031	15,0	2,2	18	0,88	0,85
3	Центр	3,5	0,31	0,0022	0,0042	18,4	2,8	26	0,82	0,97
4	Центр	4,2	0,38	0,0028	0,0050	20,2	3,1	33	0,76	1,05
5	Центр	5,1	0,44	0,0033	0,0058	22,5	3,5	40	0,70	1,14
6	Центр	5,8	0,49	0,0039	0,0066	24,1	3,8	47	0,65	1,22
7	Верх	6,2	0,53	0,0043	0,0071	25,8	4,1	52	0,60	1,30
8	Верх	6,8	0,58	0,0049	0,0078	27,2	4,4	58	0,55	1,38
9	Верх	7,3	0,62	0,0054	0,0083	28,9	4,7	63	0,50	1,45
10	Верх	7,9	0,67	0,0060	0,0090	30,5	5,0	70	0,45	1,52

Джерело: розроблено автором

Зі збільшенням параметра η відбувається розширення зони пошкодження. При значеннях понад 0.5 система переходить у стадію нестійкого руйнування. У цьому стані перерозподіл навантажень уже не компенсує втрату несучих елементів, що призводить до розвитку прогресуючого обвалення [7].

Розробка інженерних заходів підвищення стійкості панельних будівель виконується після встановлення фактичної здатності системи до перерозподілу навантажень. Спочатку визначають наявні шляхи передавання зусиль і ступінь їх резервування. Далі виконують перевірку відповідності конструкції вимогам цілісності за критеріями зв'язності, жорсткості та граничних деформацій. У цьому процесі враховують не лише несучу здатність елементів, а й здатність вузлів забезпечити передачу зусиль при втраті окремих компонентів (рис. 2) [13].

Оцінка відповідності системи нормативним вимогам виконується через узагальнений критерій зв'язності:

$$T_{req} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot l_i}{\sum_{j=1}^m A_j \cdot f_{y,j}}. \quad (16)$$

де N_i – зусилля у елементі;

l_i – довжина елемента;

A_j – площа зв'язків;

$f_{y,j}$ – межа текучості матеріалу зв'язку.

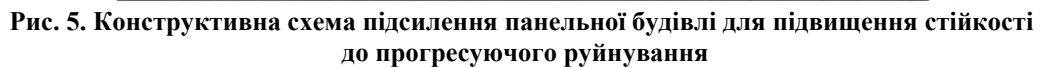
Отримане значення порівнюють із фактичними характеристиками. У разі дефіциту визначають необхідне підсилення. Далі розраховують параметри горизонтальних і вертикальних зв'язків. Для цього використовують умову рівноваги вузла:

$$\sum T_h + \sum T_v = \sum N_{loss}. \quad (17)$$

де T_h – горизонтальні зв'язки,

T_v – вертикальні зв'язки;

N_{loss} – втрачене зусилля.



Після визначення дефіциту переходять до підбору конструктивних рішень. Найбільш ефективним підходом є введення додаткових зв'язків, які забезпечують альтернативні шляхи передавання навантажень. Для оцінки їх ефективності використовується коефіцієнт перерозподілу:

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – деформації суміжних елементів;
 E_{lim} – допустиме значення.

Після підбору конструктивних рішень виконують оптимізацію схеми навантаження. Перерозподіл оцінюють через показник енергетичної ефективності:

$$\chi = \frac{\int_V \sigma \cdot \varepsilon dV}{\int_V \sigma_{max} \cdot \varepsilon dV}. \quad (21)$$

де σ_{max} – максимальні напруження.

Зменшення χ означає рівномірніший розподіл зусиль. Далі визначають локальні концентрації напружень. Для цього вводять коефіцієнт:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{avg}}. \quad (22)$$

де σ_{loc} – локальне напруження;

σ_{avg} – середнє напруження.

Перевищення граничного значення свідчить про ризик локального руйнування. Для остаточної оцінки ефективності заходів виконується порівняльний розрахунок:

$$\eta_{eff} = \frac{DCR_{before} - DCR_{after}}{DCR_{before}}. \quad (23)$$

де DCR_{before} – початкове значення;

DCR_{after} – значення після підсилення.

Зростання η_{eff} підтверджує ефективність запропонованих заходів. Отримані результати систематизуються у вигляді технічних пропозицій. Вони включають тип підсилення, параметри зв'язків і зміну розрахункових показників. Узагальнені дані наведені у таблиці 6.

Таблиця 6

Інженерні заходи підвищення стійкості панельних будівель та їх розрахункова ефективність

№	Тип заходу	$\Delta T, \%$	$\Delta K, \%$	$\Delta \sigma, \%$	$\Delta \varepsilon, \%$	k_{σ}	ψ	χ	η_{eff}
1	Підсилення стиків	+18	+15	-12	-10	1,25	0,82	0,78	0,21
2	Горизонтальні зв'язки	+22	+19	-15	-13	1,18	0,79	0,74	0,26
3	Вертикальні зв'язки	+15	+12	-10	-8	1,30	0,85	0,80	0,18
4	Комбіновані зв'язки	+30	+25	-20	-17	1,12	0,73	0,70	0,32
5	Підсилення перекриття	+12	+10	-8	-7	1,35	0,88	0,83	0,15
6	Діафрагми жорсткості	+35	+28	-22	-20	1,10	0,70	0,68	0,36
7	Перерозподіл навантажень	+14	+11	-9	-8	1,28	0,84	0,79	0,17
8	Локальне підсилення	+10	+9	-7	-6	1,40	0,90	0,85	0,12
9	Підсилення вузлів	+24	+20	-16	-14	1,16	0,76	0,72	0,28
10	Комплексне рішення	+40	+32	-25	-22	1,05	0,68	0,65	0,41

Джерело: розроблено автором

Аналіз таблиці показує, що найбільший ефект забезпечують комбіновані рішення. Вони формують нові шляхи передавання навантажень і знижують концентрацію напружень. Водночас локальні заходи демонструють обмежений вплив, оскільки не змінюють глобальну схему роботи конструкції.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Результати моделювання свідчать про те, що аварійне вилучення несучого елемента панельної будівлі зумовлює значне зростання внутрішніх зусиль у суміжних конструктивних елементах. Встановлено, що максимальні концентрації нормальних і дотичних напружень локалізуються у вертикальних стиках та зонах обпирання перекриттів. Перерозподіл навантаження характеризується вираженою нелінійністю, що супроводжується розвитком локальних пластичних деформацій у найбільш навантажених перерізах. Перевищення граничних значень коефіцієнта DCR у критичних елементах свідчить про недостатній резерв несучої здатності за розглянутих умов навантаження. Виявлено статистично значущу залежність між інтенсивністю пошкодження, геометричними параметрами конструктивної схеми та жорсткісними характеристиками міжпанельних зв'язків.

Порівняльний аналіз квазістатичного та динамічного методів розрахунку виявив принципові відмінності у прогнозуванні реакції конструктивної системи на раптову втрату несучого елемента. Показано, що динамічна постановка задачі фіксує короточасні пікові перевантаження, які суттєво перевищують оцінки, отримані в квазістатичному наближенні. Встановлено визначальну роль інерційних ефектів і швидкості розвитку пошкодження у формуванні глибини деструктивного процесу. Простежено механізм каскадної втрати стійкості за умов недостатньої зв'язності між конструктивними елементами. Доведено, що локальні відмови трансформуються у прогресуюче руйнування за відсутності альтернативних шляхів передавання навантаження.

Розрахункова оцінка інженерних заходів підвищення стійкості підтвердила ефективність введення додаткових зв'язуючих елементів та підсилення міжпанельних стиків як засобів збільшення просторової жорсткості системи. Зафіксовано зниження рівня напружень у критичних зонах і зменшення значень коефіцієнта DCR після реалізації запропонованих конструктивних рішень. Відзначено покращення показника структурної цілісності η_{eff} . Виокремлено основи стабілізації характеру перерозподілу зусиль у несучій системі в цілому. Встановлено, що комбіноване підсилення перекриттів і вертикальних зв'язків забезпечує найбільший сумарний ефект серед розглянутих варіантів втручання.

Література

1. Берчун Я. О., Теличко Р. І., Клименков О. А. Оцінка зміни технічного стану понівечених багатопверхових будівель за допомогою штучного інтелекту // Екологічна безпека та природокористування. - 2025. - № 2 (54). - С. 185–198. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.185-198>.
2. Вабіщевич М. О., Нестор Н. В., Фесун І. К., Бурківський М. М. Дослідження прогресуючого обвалення сталевих конструкцій із урахуванням фізичної нелінійності // Опір матеріалів і теорія споруд. - 2024. - № 113. - С. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.81-88>.
3. Дорофєєв В. С., Карпюк В. М., Петров О. М., Петров М. М., Крантовська О. М. Розрахунок міцності просторових перерізів прогінних залізобетонних конструкцій при їх згині з крученням за удосконаленою інженерною методологією // Наука та будівництво. - 2019. - № 4 (18). - С. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v18i4.53>.
4. ДСТУ 9294:2024. Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109531 (дата звернення: 09.07.2026).
5. Македон В. В., Михайленко О. Г. Управління внутрішніми інвестиційними проектами в регіональному промисловому кластері підприємств // Підприємництво та інновації. - 2022. - № 25. - С. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9>.
6. Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Ромін А. В. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення // Механіка та математичні методи. - 2023. - № 2. - С. 25–40. DOI: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>.
7. Радкевіч А. В., Давидов І. І., Чабан В. П., Ковтун К. А. Аналіз методів розрахунку на прогресуюче обвалення одноповерхових каркасних виробничих будівель та пошук можливостей підвищення точності розрахунків // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. - 2024. - № 122. - С. 122–129. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032>.
8. Fesun I. K., Vabishchevich M. O., Lukashevych D. Y. Analysis of foreign experience in research cases of progressive collapse of buildings and structures // Modern Construction and Architecture. - 2024. - No. 10. - P. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-45-53>.
9. European Convention for Constructional Steelwork. Mitigation of the Risk of Progressive Collapse in Steel and Composite Building Frames (FAILNOMORE). 2022. URL: https://www.steelconstruct.com/wp-content/uploads/D3-1_FailNoMoreEN_VFINAL_rev01.pdf (дата звернення: 09.07.2026).
10. Guo Y., Yang B., Dai Z., Alqawzai S., Chen K., Kong D., Tang X. Study on progressive collapse of overall structure based on numerical simulation method and prediction of structural collapse // Journal of Building Engineering. - 2025. - Vol. 99. - Art. 111416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111416>.
11. Kılıçer S., Kılıçer S. T. Progressive-collapse robustness assessment of existing reinforced concrete buildings in diverse geographical regions using the tie-force method // Buildings. - 2026. Vol. – 16. No. - 5. - Art. 1090. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings16051090>.
12. Majed D. A. J., Rasheed M. M. An analysis of a high-rise building's progressive collapse if four of its exterior columns were removed // International Journal of Engineering, Business and Management. - 2024. - Vol. 8. - No. 1. - P. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijebm.8.1.3>.
13. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2024. - No. 2 (13(128)). - P. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
14. Petrone F., Shan L., Kunnath S. K. Modeling of RC frame buildings for progressive collapse analysis // International Journal of Concrete Structures and Materials. - 2016. - Vol. 10. - P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0126-y>.
15. Sieczkowski J., Szulc J. Protection of large panel buildings against progressive collapse // Наука та будівництво. - 2023. - № 3 (37). DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-2>.
16. Yagust V. I., Yankelevsky D. Z. On potential progressive failure of large-panel buildings // Journal of Structural Engineering. - 2007. - Vol. 133. - No. 11. - P. 1591–1603. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:11\(1591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:11(1591)).

References

1. Berchun Ya. O., Telychko R. I., Klymenkov O. A. Otsinka zminy tekhnichnogo stanu ponivechenykh bahatopoverkhovykh budiviel za dopomohoiu shtuchnogo intelektu // Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia. - 2025. - № 2 (54). - S. 185–198. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.185-198>.
2. Vabishchevych M. O., Nestor N. V., Fesun I. K., Burkivskiy M. M. Doslidzhennia prohresuiuchoho obvalennia stalevykh konstrukttsii iz urakhuvanniam fizychnoi nelineinosti // Opir materialiv i teoriia sporud. - 2024. - № 113. - S. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.81-88>.
3. Dorofieiev V. S., Karpiuk V. M., Petrov O. M., Petrov M. M., Krantovska O. M. Rozrakhunok mitsnosti prostorovykh pereriziv prohnykh zalizobetonnykh konstrukttsii pry yikh zghyni z kruchenniam za udoskonalenoiu inzhenernoi metodolohiiei // Nauka ta budivnytstvo. - 2019. - № 4 (18). - S. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v18i4.53>.
4. DSTU 9294:2024. Rozrakhunok budiviel na stiiikist do prohresuiuchoho (neproporciinoho) obvalennia. Kyiv : DP «UkrNDNTs», 2024. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109531 (data zvernennia: 09.07.2026).
5. Makedon V. V., Mykhailenko O. H. Upravlinnia vnutrishnimy investytsiinymy proektamy v rehionalnomu promyslovomu klasteri pidpriemstv // Pidpriemnytstvo ta innovatsii. - 2022. - № 25. - S. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9>.
6. Otrosh Yu. A., Maiboroda R. I., Rashkevych N. V., Romin A. V. Doslidzhennia metodyk rozrakhunku prohresuiuchoho obvalennia // Mekhanika ta matematychni metody. - 2023. - № 2. - S. 25–40. DOI: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>.
7. Radkevich A. V., Davydov I. I., Chaban V. P., Kovtun K. A. Analiz metodiv rozrakhunku na prohresuiuche obvalennia odnopoverkhovykh karkasnykh vyrobnychykh budiviel ta poshuk mozhlyvostei pidvyshchennia tochnosti rozrakhunkiv // Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia. - 2024. - № 122. - S. 122–129. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032>.
8. Fesun I. K., Vabishchevych M. O., Lukashevych D. Y. Analysis of foreign experience in research cases of progressive collapse of buildings and structures // Modern Construction and Architecture. - 2024. - No. 10. - P. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-45-53>.
9. European Convention for Constructional Steelwork. Mitigation of the Risk of Progressive Collapse in Steel and Composite Building Frames (FAILNOMORE). - 2022. URL: https://www.steelconstruct.com/wp-content/uploads/D3-1_FailNoMoreEN_VFFINAL_rev01.pdf (data zvernennia: 09.07.2026).
10. Guo Y., Yang B., Dai Z., Alqawzai S., Chen K., Kong D., Tang X. Study on progressive collapse of overall structure based on numerical simulation method and prediction of structural collapse // Journal of Building Engineering. - 2025. - Vol. 99. - Art. 111416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111416>.
11. Kılıçer S., Kılıçer S. T. Progressive-collapse robustness assessment of existing reinforced concrete buildings in diverse geographical regions using the tie-force method // Buildings. - 2026. - Vol. 16. - No. 5. - Art. 1090. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings16051090>.
12. Majed D. A. J., Rasheed M. M. An analysis of a high-rise buildings progressive collapse if four of its exterior columns were removed // International Journal of Engineering, Business and Management. - 2024. - Vol. 8. - No. 1. - P. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijebm.8.1.3>.
13. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. No. 2 (13(128)). P. 47–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
14. Petrone F., Shan L., Kunnath S. K. Modeling of RC frame buildings for progressive collapse analysis // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2016. Vol. 10. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0126-y>.
15. Siczkowski J., Szulc J. Protection of large panel buildings against progressive collapse // Nauka ta budivnytstvo. - 2023. - № 3 (37). DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-2>.
16. Yagut V. I., Yankelovsky D. Z. On potential progressive failure of large-panel buildings // Journal of Structural Engineering. - 2007. - Vol. 133. - No. 11. - P. 1591–1603. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:11\(1591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:11(1591)).