

УДК 624.046;624.48;69059.2

**ОЦІНКА СТІЙКОСТІ КАРКАСНИХ БУДІВЕЛЬ ПРОТИ
ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ**

**ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ ПРОТИВ
ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ**

**THE STABILITY OF FRAME BUILDINGS AGAINST THE
PROGRESSIVE DESTRUCTION**

Кріпак В.Д., к.т.н., професор, Давиденко Р.П., аспірант (Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ)

Крипак В.Д., к.т.н., профессор, Давыденко Р. П., аспирант (Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев)

Kripak W.D., Ph.d., Professor, Davydenko R., postgraduate (Kyiv National University of construction and architecture, Kiev)

Наведені результати числового дослідження стійкості каркасного будинку проти прогресуючого обвалення при послідовному видаленні несучих вертикальних елементів, виявлені резерви міцності залізобетонного каркасу та шляхи підвищення його стійкості.

Приведены результаты численного исследования стойкости каркасного здания против прогрессирующего обрушения при последовательном удалении несущих вертикальных элементов, установлены резервы прочности железобетонного каркаса и пути повышения его стойкости.

The results of a numerical study of stability of frame buildings against progressive collapse when sequential removal of load bearing vertical elements found reserves of strength of reinforced concrete frame and ways to enhance its sustainability.

Ключові слова:

Стійкість, залізобетонний каркас, прогресуюче обвалення.

Стойкость, железобетонный каркас, прогрессирующее обрушение.

Resistance, reinforced concrete frame, progressive collapse.

Конструктивною основою більшості сучасних житлових і цивільних багатоповерхових будівель, як правило, служить монолітний залізобетонний каркас, який складається з вертикальних елементів (колон чи пілонів), ядра жорсткості, де розташовуються сходові клітки і ліфтовий

блок, і горизонтальних елементів, якими служать плоска плита перекриття, чи плита в комбінації з балками. Наявність сучасних опалубок, проста технологія їх зведення, обумовлює широке застосування багатоповерхових каркасно-монолітних будівель в багатьох великих регіонах країни.

Зведення багатоповерхових будівель в Україні регламентується ДБН В 2.2-24:2009 [1]. Норми вимагають виконання розрахунків конструктивних систем на стандартні комбінації постійних, квазіпостійних, тимчасових навантажень і впливів, а в окремих випадках і врахування дії особливих впливів (землетруси, карстові провали, підроблювані території та інше). Такі розрахунки регламентовані і виконуються по більш-менш стандартних процедурах. Врахування та дотримання всіх вимог нормативних документів забезпечує необхідний проектний рівень надійності конструкцій будівлі та їх експлуатаційний ресурс.

Однак згідно [1] для всіх багатоповерхових будівель при проектуванні рекомендується виконувати також оцінку стійкості конструктивної схеми прогресуючому руйнуванню (обваленню). Під прогресуючим руйнуванням розуміють розповсюдження початкового локального пошкодження у вигляді ланцюгової реакції від елемента до елемента, яке, в кінцевому випадку, призводить до руйнування всієї споруди. Взагалі причиною такого руйнування може бути будь-яка аварійна ситуація, яка не розглядається в звичайному проектуванні. Для оцінки стійкості будинку проти прогресуючого обвалення норми [1] рекомендують розглядати лише найбільш небезпечні розрахункові ситуації. У якості локального (гіпотетичного) обвалення для каркасної будівлі рекомендується розглядати видалення колони (пілона) одного (будь-якого) поверху будинку та обвалення ділянки перекриття одного поверху на площі локального обвалення, яка нормується.

Згідно [1, 2] розрахунок будинку у випадку локального обвалення несучих конструкцій проводиться тільки за граничними станами першої групи. Величина деформацій і ширина розкриття тріщин у конструкціях у даному випадку не регламентується. Розрахунковий опір матеріалів (сталі, бетону і арматури) згідно [3] приймається таким, що дорівнює їх характеристичним значенням. Постійні і квазіпостійні значення навантажень при перевірці стійкості будинку прогресуючому обваленню слід приймати згідно з [1] з коефіцієнтами надійності за навантаженням та за призначенням будівлі рівними одиниці. При стандартному розрахунку конструкцій будинку за граничними станами першої групи всі характеристичні значення навантажень та впливів, коефіцієнти сполучень, коефіцієнти надійності за навантаженням, коефіцієнти надійності за відповідальністю конструкцій, згідно з ДБН В.1.2-2 приймають більшими за одиницю. Таким чином в усіх конструкціях будівлі уже утворені резерви стійкості проти прогресуючого обвалення.

Каркасні будівлі мають несучі елементи, які неможливо захистити від прогресуючого обвалення тільки конструктивними заходами. Це ключові вертикальні елементи каркаса (в першу чергу колони), і для підвищення стійкості будівлі проти прогресуючого обвалення при НС слід резервувати для цих елементів додаткову міцність.

При проектуванні каркасної будівлі з захистом проти прогресуючого обвалення необхідно прогнозувати наслідки локального руйнування певних несучих елементів будівлі, руйнування яких може призвести до ланцюгової реакції обвалення. Отже, перед проектувальником стоїть декілька задач. По - перше, визначити найнебезпечніші конструктивні елементи в будівлі, руйнування яких може призвести до ланцюгової реакції обвалення. По - друге, оцінити існуючі резерви стійкості конструкцій та визначити необхідні величини резервування надлишкової несучої здатності для забезпечення стійкості проти обвалення. Крім того необхідно мати розуміння наслідків локального руйнування та оцінити масштаби можливих руйнувань. Якщо об'єми зруйнованих конструкцій виявляться значні, а величини резервування надлишкової несучої здатності конструкцій непропорційно великі, то необхідно, очевидно, змінювати конструктивну схему будівлі. Проблема захисту каркасних будівель останнім часом приділяється підвищена увага серед вітчизняних та зарубіжних вчених [4, 5].

Задачами проведеного дослідження являлися:

1. Аналіз поведінки каркасної будівлі при почерговому видаленні з роботи колон, розташованих в характерних зонах плану будинку.
2. Визначення розташування найбільш «небезпечних» колон, які можуть послідовно виключатися з роботи при ПР.
3. Аналіз впливу на перерозподіл зусиль в колонах включення в конструктивну схему будинку балок по осях колон.
4. Аналіз впливу на перерозподіл зусиль в колонах включення в розрахункову схему будинку перегородок.
5. Аналіз впливу на перерозподіл зусиль в колонах включення в конструктивну схему будинку жорстких поверхів.

Для оцінки стійкості вертикальних елементів каркасного будинку, для першого випадку локального обвалення, проведені числові дослідження 30-ти поверхової будівлі каркасного типу з використанням ПК ЛИРА-САПР 2015(R1). Будівля в плані має розміри 30 x 27 м, висоту 90 м. Будівля включає підвал висотою 3,0 м та 30-ть поверхів заввишки 3,0 м. Ядро жорсткості виконано за допомогою монолітних стін товщиною 200 мм. Крок колон прийнятий рівним 6 м в двох напрямках. Крайні та кутові колони прийняті перерізом 500x500 мм, всі інші колони мають пер середні – 600x600 мм. Товщина плит перекриттів і покриття – 200 мм. Основа будівлі прийнята умовно - фундаментна плита високої жорсткості. Зовнішні стіни прийняті із повнотілої цегли товщиною 250 мм.

Перегородки прийнято аналогічно, товщиною 120 мм. План типового поверху наведено на рис. 1.

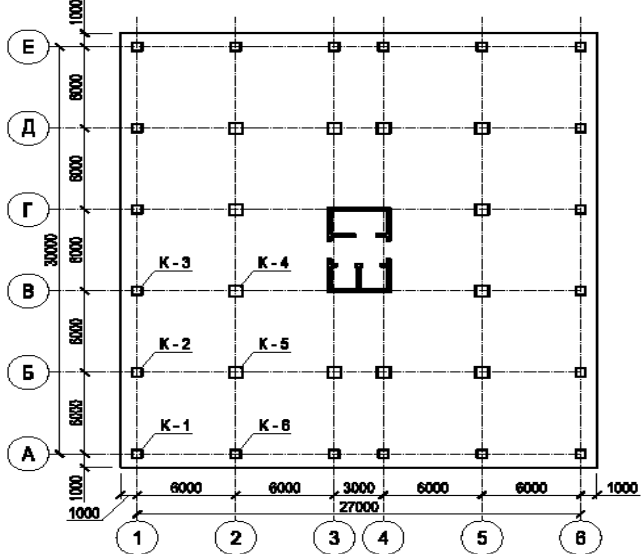
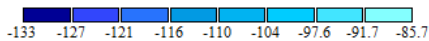


Рис. 1. План типового поверху. Маркувальний план колон.



Ізоплош переміщень по Z(G)
Единиця вимірювання - мм

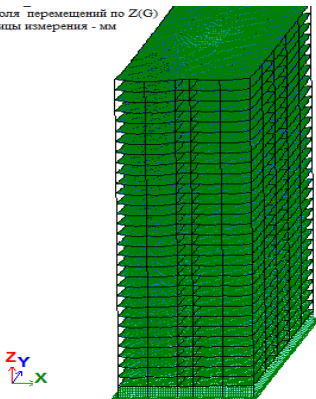
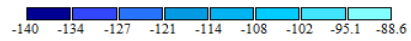


Рис. 2. Розрахункова модель каркасу.



Ізоплош переміщень по Z(G)
Единиця вимірювання - мм

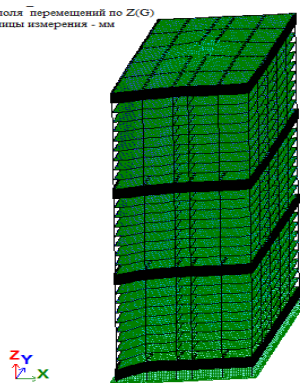


Рис. 3. Розрахункова модель каркасу з жорсткими поверхами.

Варіювались кроки колон, місця розташування колон, які виключалися з роботи, та ряд інших параметрів. Для пошуку найбільш небезпечного вертикального елемента в будівлі, було розглянуто випадки, в яких по черзі виключаються з роботи колони: К-1, яка розташована у куті будівлі, К-2 – розташована біля краю перекриття та середня колона К-5, що має найбільшу вантажну площу. Розрахункова схеми будівлі представлена на рис. 2.

В табл.1 наведені поздовжні сили N в характерних колонах будинку К-1...К-5, які отримані при розрахунках системи для наступних сполучень навантажень: $\gamma_{fm} > 1$ і $\gamma_n = 1,25$; $\gamma_{fm} > 1$ і $\gamma_n = 1,1$; $\gamma_{fm} = 1$ і $\gamma_n = 1$. Перші два сполучення використовуються при стандартних розрахунках конструкцій зі ступенем відповідальності відповідно СС1 та СС2, а останнє – рекомендується для розрахунків на прогресуюче обвалення (ПР). Порівняння свідчить, що тільки за рахунок зменшення нормованих навантажень, зусилля в колонах при розрахунках на ПР зменшується на 28...31% для будівель зі ступенем відповідальності СС1 і на 18...21% – для будівель з СС2. Це забезпечує в будинках уже певний резерв міцності для захисту від ПР.

Таблиця 1

Зусилля в колонах N , тс для різних сполучень навантажень

№ кол.	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$
	1-й поверх			6-й поверх			26-й поверх		
К-1	668	589	484	568	501	411	114	100	81
К-2	955	841	694	793	698	576	154	136	109
К-3	987	869	722	821	724	601	159	140	114
К-4	1299	1142	936	1045	919	754	203	178	140
К-5	1485	1307	1033	1210	1065	844	232	204	161
К-6	983	866	684	809	713	563	151	133	105

В таблиці 2 наведені поздовжні сили N в характерних колонах будинку К-1...К-5, які отримані при розрахунках системи на ПР, коли послідовно виключалися з роботи колони К-1, К-2 та К-5 на першому поверсі. Розрахунки виконувалися згідно методики, наведеної в ДБН В 2.2-24, дод Е.

Таблиця 2

Зусилля в колонах N , тс при розрахунках на ПР

№ кол.	Видалена К-1 на 1-му пов.			Видалена К-2 на 1-му пов.			Видалена К-5 на 1-му пов.		
	1-й пов.	6-й пов.	26-й пов.	1-й пов.	6-й пов.	26-й пов.	1-й пов.	6-й пов.	26-й пов.
К-1	-	42	20	689	555	100	504	438	89
К-2	960	763	134	-	80	40	904	702	119
К-3	721	609	118	947	748	129	759	640	123
К-4	928	752	142	990	809	152	1173	879	144
К-5	1066	892	176	1300	1004	172	-	164	82
К-6	949	748	129	698	589	113	894	689	114

При виключенні з роботи тієї, чи іншої колони, напружено-деформований стан будівлі змінюється. Довантажуються сусідні колони та розвантажуються ті, що розташовані вище зруйнованої. Аналіз сил N з табл. 2 показує, що приріст зусиль в колонах при ПР для будинків з ступенем відповідальності СС1 не є небезпечним, тобто збільшені зусилля не перевищують уже передбачених стандартним розрахунком при $\gamma_{fm} > 1$ і $\gamma_n = 1,25$. Для будинків зі ступенем відповідальності СС2 ($\gamma_{fm} > 1$ і $\gamma_n = 1,1$) збільшення зусиль при ПР спостерігається в крайніх колонах на 9...12%, в кутових колонах на 13...15%. В середніх колонах виникаючі зусилля при ПР не перевищують сформованих стандартним розрахунком.

В табл. 3, 4, 5 наведені розрахункові площі арматури в колонах К-1...К-5 для розглянутих вище всіх розрахункових ситуаціях, відповідно, при кроці колон 6,0, 7,0 та 8,0 м.

Аналіз отриманих даних свідчить, що колони багатопверхового будинку зі ступенем відповідальності СС1 запроектовані при стандартному нормованому сполученні навантажень ($\gamma_{fm} > 1$ і $\gamma_n = 1,25$) не вимагають додаткового армування при розрахунках з захистом від ПР при кроці колон каркасу від 6,0 до 8,0 м. В будівлях зі ступенем відповідальності СС2 ($\gamma_{fm} > 1$ і $\gamma_n = 1,1$) вимагають додаткового армування лише крайні колони в межах 5...10 %. Слід підкреслити, що при розрахунках армування колон, проявляються крім резервів за навантаженнями ще й резерви з міцності бетону та арматури. Згідно [1] при розрахунках на ПР використовують нормативні опори матеріалів і не беруть до уваги деформації конструкцій.

Для пошуку стійкої конструктивної схеми до прогресуючого руйнування проведено ряд варіантних розрахунків. На основі існуючої розрахункової моделі створено нову модель (рис.3). Вона враховувала введення балок в плиту перекриття по осях будівлі над 1-м, 11-м, 20-м та 30-м поверхами.

Таблиця 3

№ кол.	Розрахункова площа арматури в колонах A_s , см ²									
	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$
	1-й поверх					6-й поверх				
К-1	132	110	-	107	57	92	73	-	71	39
К-2	196	166	180	-	165	153	127	127	-	106
К-3	205	169	110	176	125	160	134	85	123	94
К-4	262	220	136	153	202	191	160	89	104	123
К-5	311	264	173	236	-	238	199	127	157	-
К-6	205	173	176	109	162	156	131	123	80	109

Таблиця 4

№ кол	Розрахункова площа арматури в колонах A_s , см ²									
	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$
	1-й поверх					6-й поверх				
К-1	187	157	-	161	96	137	113	7	121	72
К-2	269	231	250	-	238	212	182	186	3	179
К-3	261	223	159	230	169	213	178	122	168	132
К-4	357	308	207	227	288	283	234	248	266	295
К-5	426	369	261	244	-	345	287	200	244	-
К-6	276	237	249	158	237	216	185	181	126	170

Таблиця 5

№ кол	Розрахункова площа арматури в колонах A_s , см ²									
	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,25$	$\gamma_{fm} > 1$ $\gamma_n = 1,1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$	$\gamma_{fm} = 1$ $\gamma_n = 1$
	1-й поверх					6-й поверх				
К-1	243	211	-	220	134	180	157	16	176	107
К-2	369	317	336	-	319	296	253	254	17	263
К-3	336	288	206	292	220	271	232	156	218	174
К-4	488	418	284	309	388	382	326	213	234	274
К-5	593	511	357	472	-	489	402	283	346	-
К-6	365	314	331	226	326	301	250	250	183	263

Проведені розрахунки показали, що введення балок по осях колон не підвищує суттєво стійкість будівлі. Проаналізовано напружено-деформований стан колон та перекриття, коли локально включалися в роботу зовнішні стіни та цегляні перегородки, які примикали до видалених колон.

На рис. 4, 5 і 6 наведені мозаїки прогинів плити перекриття при локальному видаленні кутової, крайньої та середньої колони першого поверху. Максимальні значення прогинів коливаються від 35 мм для до 70 мм. Величина прогинів перевищує конструктивний просвіт, який передбачається між плитою перекриття і перегородками. Це дозволяє локально вводити в розрахункову модель цегляні перегородки та стіни, які примикають до видаленої колони. На рис.5 показані прогини плити з урахуванням роботи стін та перегородок.

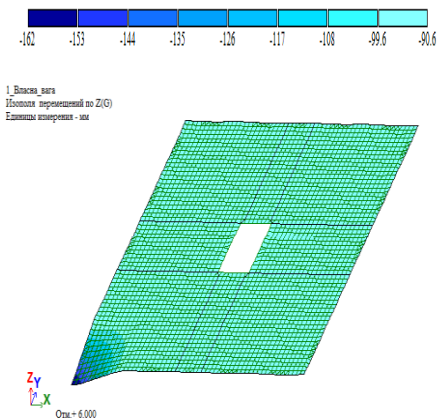


Рис. 4

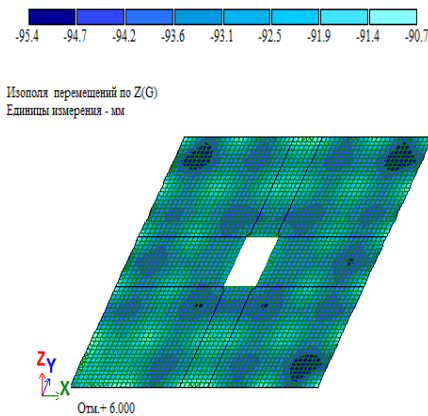


Рис. 5

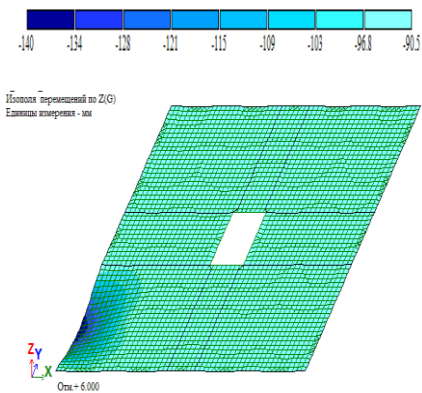


Рис. 6

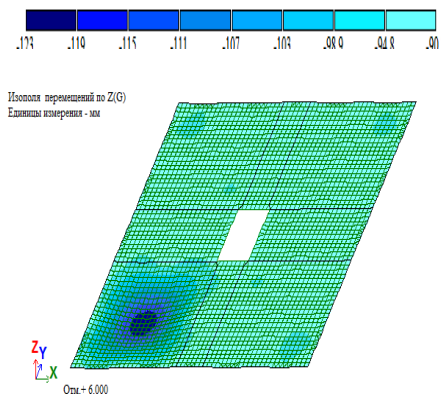


Рис. 7

Основні результати та висновки по роботі.

1. Виявлені найбільш небезпечні місця розташування видалених колон в плані та по висоті будинку. Такими являються крайні та кутові 1 поверху.
2. Колони висотних будівель мають значний резерв стійкості проти прогресуючого обвалення за рахунок запасу по навантаженням і міцності матеріалів (використовуються різні γ_n та γ_m і не нормуються деформації).

3. Суттєвий резерв стійкості будівлі проти обвалення знаходиться в використанні цегляних міжкімнатних та міжквартирних перегородок.
4. Встановлені граничні межі кроків вертикальних елементів для будівель з різної відповідальності, при яких прогресуюче обвалення не є критичним.
5. Найбільш слабким місцем для першого випадку обвалення є елементи перекриття над видаленою колоною.
6. В стиках плит перекриття з колонами рекомендується передбачати встановлення спеціальних анкерних стержнів.

1. ДБН В.2.2-24:2009 Будинки і споруди. Проектування висотних житлових і громадських будинків. 2. ДБН В.1.2-2-2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. 3. ДСТУ Б В.2.6-156:2010.Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. 4. Першаков В.М. Барабаш М.С.,та інш. Проблеми протидії конструкцій прогресивному обваленню будівель та споруд. –К.:НАУ,2015. –456 с. 5. Руденко Р. Р. Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения. Дисс. маг. техники и технологии. Санкт-Петербург:. – 91 с.