

О.М. Шаповалов, С.А. Потапов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ КАРКАСНОЇ БУДІВЛІ ПРИ РІЗНИХ ВАРІАНТАХ АРМУВАННЯ КОЛОН

В статті розглядаються питання варіантного проектування несучих елементів монолітного залізобетонного безригельного каркасу, зокрема колон, з метою забезпечення підвищеної надійності експлуатації каркасу у випадках впливу різноманітних несприятливих умов. До числа таких умов віднесені фактори непропорційного руйнування (прогресуюче обвалення), які можуть суттєво пошкодити будівлю. При варіантному армуванні колон можна досягти такого стану, коли надійність безпечної експлуатації будівлі буде найбільш виразною, що може бути рекомендаційним заходом при проектуванні багатоповерхових будівель. Відзначається, що раціональне збільшення армування колон на нижніх поверхах призводить до підвищення параметру безвідмовної роботи усієї будівлі у випадках надзвичайних ситуацій, а це служить ознакою підвищення надійності експлуатації усього запроєктованого каркасу будівлі.

Ключові слова: непропорційне руйнування, надійність та безпека експлуатації, показники надійності, залізобетонний монолітний каркас, варіантне армування, ефективність прийнятих рішень.

Актуальність проблеми

Підвищення надійності та безпеки експлуатації як окремих будівельних конструкцій, так і будівель в цілому – одне із головних завдань сучасності для проектних, будівельних та науково-дослідних організацій.

Теорія надійності та безпеки експлуатації будівель і споруд отримала особливу актуальність в останні десятиліття у зв'язку зі значною кількістю руйнувань, які приводять до суттєвих матеріальних втрат та людських жертв [1, 2].

Проектуючи певну споруду, необхідно передбачати визначений рівень надійності та безпеки експлуатації як окремих елементів, так і будівлі в цілому. Але досвід засвідчує про те, що в цілому однакові будівлі і споруди, які збудовані та експлуатуються в однакових умовах, виходять з ладу в різні випадкові проміжки часу, тобто не можна дуже точно визначити термін напрацювання будівельного виробу, а можна тільки орієнтовно оцінити ту ймовірність, з якою може безпечно експлуатуватись об'єкт на протязі заданого нормативного часу загального життєвого циклу цього об'єкту.

Нормативна документація по проектуванню будівель і споруд наполегливо вимагає враховувати принципи розрахунки на надійність та безпеку експлуатації запланованого об'єкту [3, 4]. Але ця документація не завжди визначає шляхи реалізації завдань надійності.

Одним із варіантів розрахунку будівлі на надійність може слугувати моделювання різноманітних несприятливих умов експлуатації об'єкту. В

останні роки набула широкого розповсюдження практика виключення з роботи окремих елементів будівлі або цілих блоків, тобто створення штучної аварійної ситуації, а потім аналізувати результати впливу цієї ситуації на усю будівлю.

Такий підхід може відтворювати реальні обставини експлуатації будівель і споруд і разом з тим дозволяє використовувати теоретичний апарат надійності, побудований на ймовірнісній основі. В практиці проектування вказана методика на сьогодні найбільш розповсюджена і дуже актуальна.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останніми роками у вітчизняній та закордонній проектній практиці введені поняття певного ризику і рівня наслідків від виходу з ладу якого-небудь з елементів споруди. Поряд з цим пропонуються конструктивні підходи для визначення рівня ризику, оцінки проектних рішень відвертання непропорційного руйнування, які враховують надійність та уразливість будівлі в цілому.

Розглядаються варіанти, коли захист будівель при аварійних ситуаціях в першу чергу має бути орієнтований не на зупинення руйнування, а на забезпечення безпеки людей і можливості їх своєчасної евакуації, на реалізацію необхідного для цього запасу міцності і деформації основних несучих конструкцій або зменшенню кількості руйнувань [5, 6, 7].

На сьогодні відсутній загальноприйнятий науково обґрунтований підхід або практика проектування будівель і споруд, що зберігають структурну цілісність при різних варіантах розрахункових нава-

нтажень і аварійних впливів (ПА – пректна аварія та МВК – максимально можлива катастрофа). У більшості випадків аварійні дії не можуть бути визначені кількісно, немає достатніх статистичних даних і невідома міра можливих початкових ушкоджень. Не прогноуються вірогідні варіанти подальшого непропорційного руйнування споруди через передбачені аварійні ситуації.

В роботах В.О. Алмазова [8], О.В. Кабанцева [9], А.В. Перелвмутера [10], В.С. Шмуклера [11] та інших лежить кінематичний метод теорії граничної рівноваги, в основу якого закладається спочатку стандартний пружний розрахунок з визначенням зусиль M , N і V у всіх елементах будівлі. Потім ці елементи армуються відповідно до нормативних документів і практики проектування. На наступному етапі задається якась схема руйнування і розрахунок повторюється, при цьому з'являються елементи, які виходять із ладу, виникає завдання підсилити ці елементи (колони, перекриття, вузли) і повторити розрахунок. Якщо підсилені елементи не руйнуються, тоді небезпека руйнування суттєво зменшується.

Більшість робіт, присвячених непропорційному руйнуванню, аналізує напружено-деформований стан кожного елемента, визначає теоретичні підоснови руйнування, а потім відносить цей елемент до зруйнованого або незруйнованого.

В такій аналітичній ситуації, коли виконується підсилення елементів через збільшення армування або через підвищення класу бетону (від С 20/25 до С 32/40), цікавим з'являється питання, як впливають такі заходи на підвищення або зниження надійності роботи усього залізобетонного каркасу будівлі.

Слід підкреслити, що такий аналіз в публікаціях дуже обмежений. Можна тільки відмітити роботи Руденко В.В. та Пічугіна С.Ф. [12, 13].

Як правило, у проаналізованих джерелах питання непропорційного руйнування (прогресуючого обвалення) вирішуються окремо, а питання надійності роботи конструкції окремо.

В даній статті зроблена спроба об'єднати ці два завдання, використовуючи реальні конструкторські розробки монолітних залізобетонних каркасних будівель і споруд.

Мета проведення досліджень

На базі аналітичного огляду існуючих нормативних документів та чисельних методів розрахунку (з використанням програмного комплексу SCAD, версія 21.1.9.5) будівельних конструкцій при врахуванні непропорційного руйнування запропонувати ефективний алгоритм оцінки надійності роботи залізобетонного каркасу при змінних процентах армування колон уздовж їхньої висоти.

При цьому створюється модель обвалення будівлі за теорією ймовірності – 3х-елементна модель

(колони, перекриття, вузли). Виконується аналіз несучої здатності залізобетонного каркасу при зміні процентів армування колон уздовж їхньої висоти, можливі також варіанти підвищення класу бетону. На основі цих аналітичних розрахунків з визначенням надійності роботи кожного варіанту сформувавши практичні рекомендації щодо впровадження аналітичного підходу при визначенні надійності роботи залізобетонного каркасу у випадку аварійної ситуації у вигляді непропорційного руйнування.

Виклад основного матеріалу

В якості елемента дослідження прийнятий 14 поверховий з підвалом житловий будинок, запроектований та збудований в м. Харкові. Висота поверхів складає 2,82 м. Конструктивна схема цієї будівлі – монолітний залізобетонний безригельний каркас з влаштуванням суцільних діафрагм жорсткості у поздовжньому та поперечному напрямках. Розмір будівлі в плані 23,95 x 27,80 м. Товщина плит перекриття 180 мм. Сітка колон у більшості випадків 4,5 x 5,0 м. Загальний вигляд будівлі приведений на рис.1.



Рис.1. Загальний вигляд будівлі

Головним завданням дослідження було визначення аналітичним шляхом параметра надійності роботи цього каркасу у випадку непропорційного обвалення частини будівлі. При цьому змінювались варіанти армування колон та класи бетону. Для руйнування передбачена аварійна ситуація в підвалі (вибух газу), що привів до виходу із експлуатації 3 колони та частину діафрагми жорсткості.

Розрахунок будівлі виконувався на програмному комплексі SCAD Office версія 21.1.9.5. На основі статичного та конструктивного розрахунку було розглянуто 5 можливих варіантів армування колон. При цьому сама колона була розділена по висоті на 4 зони, в кожній із яких армування було своє. Для I та IV варіантів клас бетону прийнятий С 20/25, для II, III та V варіантів використаний бетон класу С 32/40. Такий підхід дозволив оцінити вплив під-

вищення класу бетону на показники надійності у випадку непропорційного обвалення.

Методика визначення надійності роботи каркасної будівлі побудована на відомому принципі створення технічної моделі усього каркасу з паралельним об'єднанням трьох блоків (колон, перекриттів та вузлів з'єднання колон з перекриттям). Ці блоки групуються зі своїми параметрами надійності, а потім визначається параметр безвідмовної роботи усієї системи $P_s(t)$ за формулою:

$$P_s(t) = r[P_i(t)_{max}] + (1 - r)[1 - \prod_{i=1}^n \{1 - P_i(t)\}] \quad (1)$$

де r – узагальнений коефіцієнт кореляції,
 r_m – середній коефіцієнт кореляції.

$$r_m = \frac{2}{n(n-1)} \sum r_{ij} \quad (2)$$

n – кількість елементів в системі технічної моделі;

r_{ij} – коефіцієнти кореляції по кожному блоку.

Детальні викладки формули (1) наведені в джерелах [14, 15].

На основі виконаних розрахунків приведена таблиця 1, де наведені усі характеристики надійності розрахункової моделі, в також кількість зруйнованих елементів для кожного запропонованого варіанту армування.

В таблиці 2 приведені розрахункові показники для визначення ймовірності безвідмовної роботи всієї системи.

Як свідчать результати розрахунку, для кожного запропонованого варіанту армування ймовірність надійної безвідмовної роботи каркасу досить висока, але найбільш надійна для III варіанту, коли в нижній зоні колон закладається 8Ø32A400C ($m = 2,57\%$). Показник $P_s(t)$ складає 0,998, що засвідчує високу розрахункову надійність роботи каркасу у випадку непропорційного обвалення.

Таблиця 1
 Визначення кількості зруйнованих елементів каркасу при розвитку непропорційного обвалення від заданої аварійної ситуації

		ВАРІАНТИ																			
μ4	4 зона 8,46 м	I бетон С 20/25				II бетон С 32/40				III бетон С 32/40				IV бетон С 20/25				V бетон С 32/40			
				μ1 = 1,57	μ2 = 1,00	μ3 = 0,50	μ4 = 0,50	μ1 = 1,57	μ2 = 1,00	μ3 = 0,50	μ4 = 0,50	μ1 = 2,57	μ2 = 2,57	μ3 = 0,50	μ4 = 0,50	μ1 = 1,00	μ2 = 1,00	μ3 = 1,57	μ4 = 1,57	μ1 = 1,00	μ2 = 1,00
μ3	3 зона 11,28 м	ЗРУЙНОВАНІ КОЛОНИ (шт.)																			
		14	7	3	18	13	2	6	9	10	1	6	7	15	9	6	6	13	7	6	6
		загалом:	42				30				24				36				32		
μ2	2 зона 11,28 м	ЗРУЙНОВАНЕ ЧАСТКОВО ПЕРЕКРИТТЯ (м²)																			
		910	549	465	276	420	320	200	190	125	95	75	25	142	188	181	109	64	105	84	52
		загалом:	2200				1130				320				620				305		
μ1	1 зона 11,46 м	ЗРУЙНОВАНІ ВУЗЛИ (шт.)																			
		12	6	2	16	11	1	5	8	9	1	6	4	14	8	5	5	11	6	4	4
		загалом:	36				25				20				32				25		
		ЗНАЧЕННЯ m НАВЕДЕНІ В %																			

Таблиця 2
 Розрахункові показники для визначення в колонах ймовірності безвідмовної роботи системи

Показники	I	II	III	IV	V
1. Середнє значення m	0,89	0,89	1,535	1,285	1,285
2. Середня величина зруйнованих колон	10,5	7,5	6	9	8
3. Коефіцієнт кореляції	0,21	0,423	-0,146	-0,824	-0,576
4. Показник надійності	0,929	0,949	0,959	0,939	0,942
5. Узагальнений коефіцієнт кореляції	0,189	0,315	0,051	0,596	-0,017
6. Ймовірність безвідмовної роботи системи	0,978	0,986	0,998	0,969	0,983

Висновок

Виконані теоретичні дослідження надійності роботи монолітного залізобетонного каркасу у випадках надзвичайних аварійних ситуацій (непропорційне обвалення) засвідчили про те, що найбільш ефективним конструктивним рішенням для стримування руйнування будівлі є збільшення проценту армування колон нижніх 4-5 поверхів. Має певний вплив і підвищення класу бетону в колонах.

Для вирішення значення необхідного проценту армування колон необхідно використовувати декілька варіантів армування і прийняти рішення конструктивного та економічного характеру. На прикладі об'єкту, що розглянутий в статті, найбільш прийнятним був процент армування в межах 2,6-3,0%. В деяких випадках ця величина може бути зменшена або збільшена в межах 20-30%.

Література

1. Михайлов, Л.А. *Чрезвычайные ситуации природного, техногенного и социального характера и защита от них [Текст]* / Л.А. Михайлов. – Учебник для вузов. – СПб. : Питер – 2009. – 240 с.
2. Краснощёков, Ю.В. *Основы проектирования конструкций зданий с сооружений [Текст]* / Ю.В. Краснощёков, М.Ю. Заполева. – Учебное пособие. – 2с узд., испр. и доп. – Москва : Инфра-Инженерия. – 2019. – 316 с.
3. ДБН В.1.2-14:2018 *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд [Текст]*. – Дійсний з 01.01.2019. - *Мінрегіонбуд та ЖКГ України*. – Київ, 2018. – 30 с.
4. ДБН В.1.2-9-2008 *Основні вимоги до будівель і споруд. Безпека експлуатації [Текст]*. – Чинний від 01.09.2008. – Київ : Мнрегіонбуд України, 2008. – 27 с.
5. ДБН В.2.2-24:2009 *Проектування висотних житлових і громадських будинків [Текст]*. Чинний від 01.09.2009. – Київ : Мнрегіонбуд України, 2009. – 109 с.
6. Тур, А.В. *Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки [Текст]* / А.В. Тур // *Вестник Брестского государственного технического университета*. - №1, *Строительство и архитектура*. – 2012. – С. 152-159.
7. Назаров, Ю.П. *До проблеми забезпечення чутливості будівельних конструкцій при аварійних впливах [Текст]* / Ю.П. Назаров, О.С. Городецький, В.М. Симбіркін // *Будівельна механіка і розрахунок споруд*. – Київ, 2009. - №4. – С. 5-9.
8. Алмазов, В.О. *Проблеми опору будівель прогресуючому руйнуванню [Текст]* / В.О. Алмазов, А.В. Плотников, Б.З. Расторгуев // *Вісник МГСУ*. - Москва, 2011. - № 2. – С. 15-20.
9. Кабанцев, О.В. *Розрахунок конструкцій багатопверхових і висотних залізобетонних споруд з урахуванням зміни основних параметрів розрахункової моделі в режимах впливу і експлуатації [Текст]* / О.В. Кабанцев // *Бетон і залізобетон, погляд у майбутнє. III Всеукраїнська (II Міжнародна) конференція по бетону і залізобетону*. – 2014. – том 1. – С. 282-292.

10. Перельмутер, А.В. *Розрахункові моделі споруд та можливості їхнього аналізу [Текст]* / А.В. Перельмутер, В.І. Слівкер. – Київ, 2002. – 615 с.
11. Шмуклер, В.С. *До спрощення нелінійного розрахунку залізобетонних елементів [Текст]* / В.С. Шмуклер // *Бетон і залізобетон в Україні*. - Полтава, 2012. - № 4. – С. 17-20.
12. Руденко, В.В. *Захист каркасних будівель від прогресуючого обвалення [Текст]* / В.В. Руденко, Д.В. Руденко // *Інженерно-будівельний журнал*. – 2009. - № 3. С. 38-41.
13. Пічугін, С.Ф. *Надійність сталевих конструкцій виробничих будівель [Текст]* / С.Ф. Пічугін. – Москва : вид. АСВ, 2011. – 456 с.
14. Шаповалов, О.М. *Теоретичні основи забезпечення надійності багатопверхових будівель у разі прогресуючого обвалення [Текст]* / О.М. Шаповалов, В.В. Руденко // *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. – Харків, 2016. – вип.166. – С. 38-47.
15. Кудзис, А.П. *Оцінка надійності залізобетонних конструкцій [Текст]* / А.П. Кудзис. – Вільнюс : Мокслас, 1985. – 156 с.

References

1. Mikhailov, L.A. (2009) Intermediate situations of natural, technogenic and social character and protection from them. Textbook for universities. - St. Petersburg, 240.
2. Krasnoshchekov, Yu.V., Zapoleva, Yu.V. (2019) Fundamentals of design of constructions of buildings from constructions. Textbook. - 2s uzd., Ispr. and ext. - Moscow: Infra-Engineering, 316.
3. DBN B.1.2-14: 2018 General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures (2018) Valid from 01.01.2019. - Ministry of Regional Development and Housing of Ukraine. - Kyiv, 30.
4. DBN B.1.2-9-2008 Basic requirements for buildings and structures. Operational safety (2008). Valid from 01.09.2008. - Kyiv: Mnregionbud of Ukraine, 27.
5. DBN B.2.2-24: 2009 Design of high-rise residential and public buildings (2009). Valid from 01.09.2009. - Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 109.
6. Tour, A.W. (2012) Resistance of bending reinforced concrete elements at sudden application of loading. *Bulletin of Brest State Technical University. Construction and Architecture Tour*, 1, 152-159.
7. Nazarov, Yu.P., Gorodetsky, O.S., Simbirkin, V.M. (2009) To the problem of ensuring the sensitivity of building structures in case of emergency influences. *Building mechanics and calculation of structures*, 4, 5-9.
8. Almazov, VO, Plotnikov, AV, Rastorguev, BZ (2011) Problems of resistance of buildings to progressive destruction. *Bulletin of the Moscow State University*, 2, 15-20.
9. Kabantsev, OV (2014) Calculation of structures of multi-storey and high-rise reinforced concrete structures taking into account changes in the main parameters of the calculation model in the modes of influence and operation. *Concrete and reinforced concrete, a look into the future. III All-Ukrainian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete*, 1, 282-292.
10. Perelmuter, A.V., Sliver, VI (2002) Calculation models of buildings and possibilities of their analysis, 615.

11. Schmuckler, W.S. (2012) To simplify the nonlinear calculation of reinforced concrete elements. *Concrete and reinforced concrete in Ukraine*, 4, 17-20.
12. Rudenko, VV, Rudenko, DV (2009) Protection of frame buildings from progressive collapse. *Engineering and Construction Journal*, 3, 38-41.
13. Pichugin, SF (2011) Reliability of steel structures of manufacturing buildings. Moscow: type. DIA, 456.
14. Shapovalov, OM, Rudenko, VV (2016) Theoretical bases of ensuring the reliability of multi-storey buildings in the case of progressive collapse. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 166, 38-47.
15. Kudis, A.P. (1985) Estimation of reliability of reinforced concrete constructions. Vilnius: Moxlas, 156.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна

Автор: ШАПОВАЛОВ Олександр Микитович
професор кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – ashapovnik@gmail.com

Автор: ПОТАПОВ Сергій Анатолійович
магістр кафедри будівельних конструкцій
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – potapovs201405@gmail.com

DETERMINATION OF RELIABILITY OF OPERATION OF MULTI-STOREY FRAME BUILDING AT DIFFERENT VARIANTS OF COLUMN REINFORCEMENT

O. Shapovalov, S. Potapov

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

The article considers the issues of variant design of bearing elements of monolithic reinforced concrete cross-barless frame. In particular, the columns, in order to ensure increased reliability of operation of the frame in cases of exposure to various adverse conditions. Such conditions include factors of disproportionate destruction (progressive collapse), which can significantly damage the building. With variant reinforcement of columns, it is possible to achieve a state when the reliability of safe operation of the building will be most pronounced, which may be a recommended measure in the design of multi-storey buildings. It is noted that a rational increase in the reinforcement of columns on the lower floors leads to an increase in the parameter of trouble-free operation of the entire building in emergencies, and this is a sign of increasing the reliability of the entire designed frame of the building.

The technology of estimating the reliability parameters is that along the height of the column there are four to five sections with a certain percentage of reinforcement, the maximum percentage (up to 2% -3.5%) is located in the lower zone of the columns, and the smallest % -1.0%) at the top of the columns. This armature is appointed proceeding from statistical calculation of a skeleton and the received internal efforts of M, N, V. In the resulted article as the device of calculation of a 14-storeyed with a cellar of a inhabited frame building the software and computer complex "SCAD" version 21.1.9.5 is used. The emergency situation is predicted in the form of an explosion in the basement of a residential building, which led to the destruction of three columns of the corner of the building and one stiffness diaphragm. Five possible options for column reinforcement were compared (there are 585 columns in the frame of the building). In the first and second embodiments, the reinforcement of the lower two zones was $\mu = 1.57\%$, the upper two zones $\mu = 0.5\%$, in the third variant, the reinforcement of the lower two zones was $\mu = 2.57\%$. In the fourth and fifth variants, the lower two zones had reinforcement $\mu = 1.0\%$, the upper two zones $\mu = 1.57\%$.

In each of the variants the strength of the concrete changed: for the I and IV variants it corresponded to class C20 / 25; for II, III and V variants the concrete class corresponded to C32 / 40. The parameter of failure-free operation $P(t)$ for the frame in each case was determined by the method of Kudzis AP The calculations showed that the values of $P(t)$ for each option were: I - 0.978; II - 0.986; III - 0.998; IV - 0.969; V - 0.983. Thus, the most effective was the third option (maximum reinforcement of the lower tiers of the columns), which is recommended for implementation in the actual design.

Keywords: disproportionate destruction, reliability and safety of operation, reliability indicators, reinforced concrete monolithic framework, variant reinforcement, efficiency of the accepted decisions.