

Проектування багатопверхових виробничих будівель із врахуванням стійкості до прогресуючого обвалення у ПК SCAD++

Design of multi-story industrial buildings taking into account resistance to progressive collapse in the SCAD++ PC

**Ротко С.В., к.т.н., доц., Талах Л.О., к.т.н., доц., Дудка С.С., магістр
(Луцький національний технічний університет, Луцьк)**

**Rotko S., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Talakh L.O., Ph.D.
in Engineering, Dudka S.S., master (Lutsk National Technical University,
Lutsk)**

У роботі виконано дослідження конструктивної системи багатопверхової виробничої будівлі на стійкість до прогресуючого обвалення у ПК SCAD++ для забезпечення її живучості протягом усього періоду експлуатації. Встановлено, що врахування можливого локального руйнування на етапі проектування дає можливість убезпечити будівлю від ймовірного прогресуючого обвалення.

Progressive collapse is a process in which local damage to a structure leads to a chain reaction of destruction that spreads to the entire building or a significant part of it. This phenomenon can have catastrophic consequences, so understanding its causes is extremely important for ensuring the safety of buildings and structures.

The most common causes of progressive destruction are external influences caused by natural or man-made factors. Traditionally, the highest percentage of such destruction is occupied by brittle destruction (for example, during fires) and loss of stability (due to seismic effects, explosions, impacts, etc.), less often by fatigue and ductile destruction.

To prevent progressive destruction when making design decisions, it is necessary first to reduce the level of risk by directly calculating such risk. It is important to use such calculation and design solutions that will make possible damage impossible (general strengthening of the entire building, local strengthening, interconnection). Structural interconnection of elements (or structural continuity) is also noted among the methods of general or local strengthening.

Progressive collapse usually begins with the loss of stability and strength of one or more vertical structural elements of a building or structure (columns or pylons). For the building to withstand, it is necessary to provide an alternative path for transferring the load to other structural elements. Adjacent elements must be designed to resist these redistributed loads (those that the collapsed structure would have to bear). Otherwise, collapse will inevitably occur, and further load redistribution will occur until equilibrium is reached. This in turn will lead to partial or complete collapse of the building or structure.

Protection against progressive collapse involves computer modeling using finite element and limit equilibrium methods. It allows you to create full-fledged models that almost completely correspond to the response of the building to local destruction.

The work performed a calculation of a multi-story building of the production building of a compound feed plant with a steel frame for progressive collapse. The calculation was performed using licensed software - SCAD Office - an integrated system for strength analysis and design of structures of the MSE.

Ключові слова: локальне пошкодження, прогресуюче обвалення, живучість будівлі.

Keywords: local damage, progressive collapse, building survivability.

Вступ. Миттєве руйнування будівель може бути викликане силовими чи деформаційними впливами (наприклад, вибухом, ударом при зіткненні, пожежею, руйнуванням фундаментів через зсуви чи підтоплення ґрунтовими водами, аварії на водоводах).

Серед причин можуть бути також помилки на стадії проектування (зокрема, при розрахунках вузлів кріплень і несучих конструкцій), ослаблення структури матеріалів елементів через корозію тощо. Це може стати причиною зміни конструктивної схеми будівлі внаслідок зниження жорсткісних характеристик конструкцій і вплинути на безпеку будівлі загалом або якоїсь її частини. Якщо ж виникає загроза найгіршого поєднання негативних впливів, то це може може закінчитись миттєвим руйнуванням, т.зв. прогресуючим обваленням [1].

Аварії на виробництвах можуть мати катастрофічні наслідки – як економічні, так і соціальні, часто – з людськими жертвами.

З початку повномасштабного вторгнення росії наша країна несе величезні втрати активів підприємств та промисловості. Руйнування великої кількості будівель і споруд при цьому часто мають ознаки прогресуючого обвалення. Тому для попередження випадків миттєвого руйнування необхідно при проектуванні об'єктів вести розрахунки з урахуванням стійкості до прогресуючого обвалення.

Аналіз публікацій. Найчастішими причинами прогресуючого руйнування вважають зовнішні впливи, спричинені природними чи техногенними факторами. Найвищий відсоток таких руйнувань займає крихке руйнування (наприклад, при пожежах) і втрата стійкості (внаслідок сейсмічних впливів, вибухів, ударів тощо), рідше – втомне та в'язке руйнування [2].

При прийнятті проектних рішень для зменшення ризиків прогресуючого обвалення важливо в першу чергу використовувати такі розрахунково-конструктивні рішення, які унеможливають якісь пошкодження. Йдеться про загальне зміцнення всієї будівлі, місцеве зміцнення і взаємозв'язок. Конструктивний взаємозв'язок елементів (або

безперервність конструкції) також відзначається серед способів загального чи місцевого зміцнення [2].

Якщо йдеться про місцеве зміцнення, тобто, про підсилення найбільш чутливих місць, то іноді буває важко стандартизувати ці моменти – з тим, щоб включити їх до норм проектування. Повністю забезпечити будівлю від можливих терористичних атак, вибухів під час бомбардувань, від влучання снарядів конкретного виду та визначеної потужності надзвичайно важко, тому що прорахувати усі можливі варіанти практично неможливо.

Прогресуюче обвалення зазвичай розпочинається з втрати стійкості та міцності одного чи кількох вертикальних конструктивних елементів будівлі чи споруди (колон або пілонів). Щоб не допустити подальшого руйнування, необхідно забезпечити альтернативний шлях передачі навантаження на інші елементи конструкції. Важливо, щоб сусідні елементи були розраховані на опір цим перерозподіленим навантаженням (тим, які б мала нести зруйнована конструкція). Інакше руйнування обов'язково станеться, а подальший перерозподіл навантаження відбуватиметься аж до досягнення рівноваги. Це у свою чергу призведе до часткового або повного руйнування будівлі чи споруди [3].

Формулювання «прогресуючого обвалення» у чинних нормативах [4-7] можуть трохи відрізнитись, проте суть цього поняття однозначна: якщо у якомусь конструктивному елементі будівлі чи споруди внаслідок аварійних впливів (вибухів, пожеж, ударів) виникає локальне руйнування, то будівля в цілому має встояти, мінімум – до того часу, доки будуть евакуйовані люди.

Постановка мети. Дослідження конструктивної схеми багатоповерхової виробничої будівлі на стійкість до прогресуючого обвалення у ПК SCAD++ для забезпечення її живучості протягом усього періоду експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для розрахунку було взято будівлю виробничого корпусу підприємства з виготовлення комбікормів зі сталевим каркасом. Застосоване ліцензоване програмне забезпечення - SCAD Office - інтегрована система міцнісного аналізу та проектування конструкцій MCE [8].

Характеристики досліджуваної будівлі:

- частина виробничого корпусу в осях А-К і 3-5 розмірами 21х12 м 8-ми поверхової будівлі загальною висотою 43,5 м у металевому каркасі;
- крок колон у напрямку цифрових осей – 6м, у напрямку буквених – по 6 і 3м;
- колони суцільного постійного двотаврового перерізу, прокатні, схема опирання на фундаменти – защемлення;

- головні балки покриття і перекриття – складеного перерізу, суцільні, з ребрами жорсткості з кроком 1000 мм. Схема обпирання на колони – жорстка, збоку;
- другорядні балки – прокатні, двотаврового перерізу, схема обпирання – шарнірна, в одному рівні з головними балками.

Розрахунок на стійкість до прогресуючого руйнування виконували у квазістатичній постановці [8].

На першому етапі визначали найбільш завантажені конструктивні елементи. Для цього було створено модель будівлі у просторовій постановці (рис. 1).

Розрахунок будівлі за першою групою граничних станів в умовах нормальної експлуатації виконували за [9, 10] на усі діючі завантаження: постійні (від власної ваги конструкцій каркасу, ваги конструкції підлоги на перекриття, ваги конструкції покриття; змінні, у т.ч. квазіпостійні (від ваги обладнання) і короточасні (корисне від ваги людей та снігове). Розрахунок виконували на розрахункові сполучення зусиль (РСЗ) і за його результатами визначали найбільш завантажені вертикальні елементи (колони).

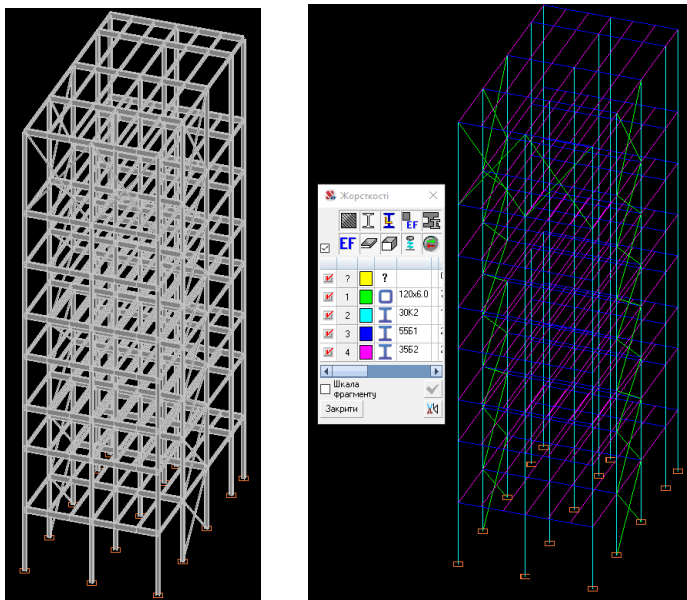


Рис. 1. Схема просторового каркасу в осях 3-5 з призначеними жорсткостями

На другому етапі, після видалення найзавантаженішої колони, виконали розрахунок конструктивної системи на стійкість до

прогресуючого обвалення. Цей розрахунок виконують на спеціальне поєднання навантажень і впливів, що містять постійні та змінні квазіпостійні навантаження. При цьому приймають нормативні характеристики міцності та деформативності матеріалів.

Результати дослідження

За результатами статичного розрахунку було визначено місце можливого локального руйнування – найбільш завантажену середню колону К-20 нижнього поверху на перетині осей 4 і Г (виділено на рис. 2).

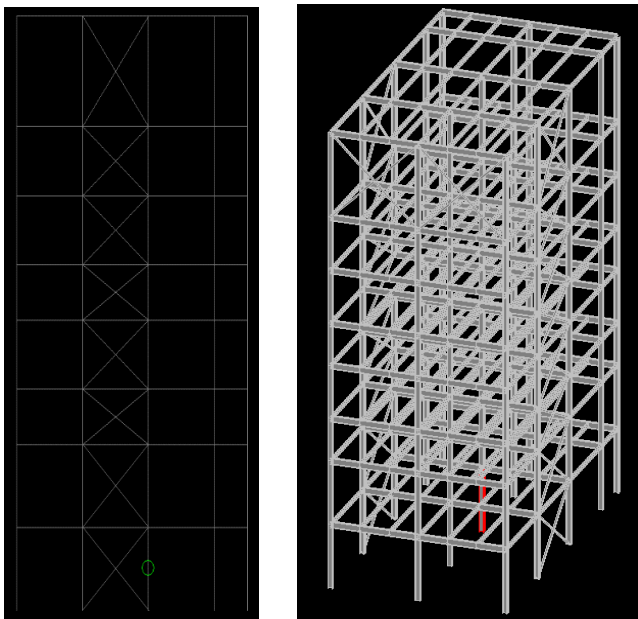


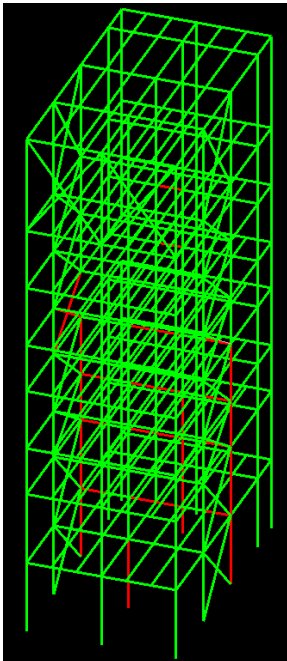
Рис. 2. Видалення найбільш завантаженої колони (К-20)

Після видалення цієї колони і проведення розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення експертиза встановила, що міцність деяких елементів розрахункової схеми (на рис. 3 виділені червоним кольором) недостатня.

Для захисту даної ділянки будівлі та забезпечення стійкості до прогресуючого обвалення було прийнято рішення про підсилення визначених програмою елементів за рахунок заміни їх перерізів, а також встановлення додаткових вертикальних в'язів для забезпечення більшої жорсткості та стійкості. Після зміни розрахункової схеми, заміни жорсткостей та повторної експертизи було встановлено, що проведені заходи довели свою ефективність (рис. 4). Для подальшого коригування

жорсткісних характеристик залишається ще невикористана можливість зміни марки сталі.

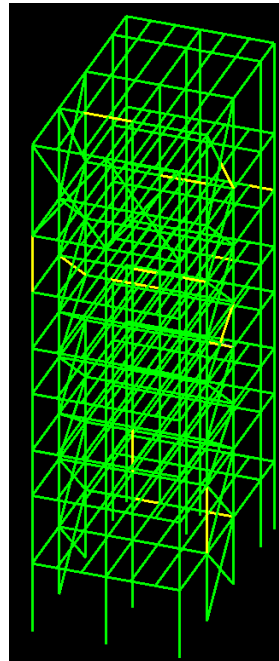
Під час аналізу екстремальних факторів експертизи підібраних програмою перерізів сталевих елементів каркасу встановлено, що врахування можливого локального руйнування на етапі проектування дає можливість забезпечити будівлю від ймовірного прогресуючого обвалення. Цього можна досягти улаштуванням додаткових в'язів, заміною марки сталі чи підбором потужнішого перерізу для конструктивного елемента розрахункової моделі.



Результати експертизи

Критичний фактор K_{max}			
<input checked="" type="checkbox"/>	0.25	0.99	619
<input checked="" type="checkbox"/>	0.99	1.01	0
<input checked="" type="checkbox"/>	1.01	1243.64	32

Рис. 3. Результати експертизи елементів (після видалення колони К-20)



Результати експертизи

Критичний фактор K_{max}			
<input checked="" type="checkbox"/>	0.53	0.99	631
<input checked="" type="checkbox"/>	0.99	1	20

Рис. 4. Результати експертизи після заміни перерізів

Висновки. Єдиної методики розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення на сьогодні немає. Важливим завданням у цьому напрямку є ґрунтовне дослідження впливів запроектованих і аварійних навантажень, усіх можливих найнесприятливіших їх комбінацій на конструктивні елементи будівель і споруд. Особливо актуальним це завдання є в умовах воєнного часу.

Метод можливого пошкодження є наразі найпоширенішим методом розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення. При цьому найбільш навантажений (чи ушкоджений) елемент видаляють із розрахункової моделі, як зруйнований. Саму ж модель розраховують так, щоб забезпечити будівлю від подальшого руйнування.

Встановлено, що врахування можливого локального руйнування на етапі проектування дає можливість забезпечити будівлю від ймовірного прогресуючого обвалення. Цього можна досягти улаштуванням додаткових в'язів, заміною марки сталі чи підбором потужнішого перерізу для конструктивного елемента розрахункової моделі.

References

1. Barmin I.V. KRM za spets. 192. Zabezpechennia zhyvuchosti budivelnnykh konstruksii pry nadzvychainykh sytuatsiiakh. Kyiv: NAU, 2022.
2. О.М. Pustovoitova, S.M. Kamchatna, Ye.F. Orel, S.Iu. Naboka. Stratehii proektuvannia sporud z urakhuvanniam prohresuiuchoho ruinuvannia. Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT, 2015, vyp.151, s. 128-134.
3. Otrosh Yu. A., Maiboroda R. I., Rashkevych N. V., Romin A. V. Doslidzhennia metodyk rozrakhunku prohresuiuchoho obvalennia. Mekhanika ta matematychni metody, 2023. T. V. № 2. S. 25–40. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>
4. DBN V.1.2-14:2018 Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnnykh ob'ektiv. Zahalni pryntsyzy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. Zi Zminoiu № 1
5. DBN V.2.2-41:2019 Vysotni budivli. Osnovni polozhennia. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/v_2_2_41/1-1-0-1855
6. Proiekt DSTU KhKhKhKh:202Kh. Rozrakhunok budivel na stiikist do prohresuiuchoho (neproportsiinoho) obvalennia. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu:https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109531
7. DBN V.1.1-7:2016 Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy. K.: Minrehionbud Ukrainy, 2017.
8. SCAD Office. Versiia 23. Vychyslytelnyi kompleks SCAD++ / V.S. Karpylovskiy, Э.З. Kryksunov, A.A. Maliarenko, A.V. Perelmuter, M.A. Perelmuter, S.Iu. Fyalko. 992 s. Elektronna versiia. K.: SSAD Soft, 2024.

9. DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. Kyiv: MINBUD Ukrainy, 2006. 75c.
10. DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia. Zi Zminoiu №1 K.: Minrehion Ukrainy, 2014.
11. A.V. Radkevich, I.I. Davydov, V.P. Chaban, K.A. Kovtun. Analiz metodiv rozrakhunku na prohresuiuche obvalennia odnopolykhovykh karkasnykh vyrobnychkykh budivel ta poshuk mozhlyvosti pidvyshchennia tochnosti rozrakhunkiv. Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury, № 1 (019), 2024. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.270224.122.1032>
12. Rotko S.V., Dudka S.S. Otsinka konstruktivnoi skhemy bahatopolykhovoi vyrobnychoi budivli na stiikist do prohresuiuchoho obvalennia u PK SCAD // Innovatsiini protsesy v haluzi dorozhnoho budivnytstva: zbirnyk tez dopovidei II Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv (6 lystopada 2021 r., m. Lutsk) – Lutsk: Lutskiy NTU, 2024. – S. 78-81. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: https://drive.google.com/file/d/1o_opa3hksqd3QCzy78yns-NxAOqcEhmR/view
13. Rotko, Zadorozhnikova, Murafa, Riabyi, Kozak. Rozrakhunok konstruksii na stiikist do prohresuiuchoho ruinuвання za dopomohoiu prohramnoho zabezpechennia. Innovatsii u budivnytstvi: zb. tez dop. IX Mizhn. nauk.-prakt. internet-konf. z dob. vyshchoi osvity ta mol. uch., 14 travnia 2024 r., m. Lutsk. LNTU, 2024. S. 63-65. <https://sites.google.com/view/iic-2024/tezy-dopovidei>

Література

1. Бармін І.В. КРМ за спец. 192. Забезпечення живучості будівельних конструкцій при надзвичайних ситуаціях. Київ: НАУ, 2022.
2. О.М. Пустовойтова, С.М. Камчатна, Є.Ф. Орел, С.Ю. Набока. Стратегії проектування споруд з урахуванням прогресуючого руйнування. Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2015, вип.151, с. 128-134.
3. Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Рашкевич Н. В., Ромін А. В. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення. Механіка та математичні методи, 2023. Т. V. № 2. С. 25–40. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>
4. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1.
5. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/v_2_2_41/1-1-0-1855

6. Проект ДСТУ XXXX:202X. Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109531
7. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. К.: Мінрегіонбуд України, 2017.
8. SCAD Office. Версія 23. Вычислительный комплекс SCAD++ / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, С.Ю. Фиалко. 992 с. Електронна версія. К.: SCAD Soft, 2024.
9. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: МІНБУД України, 2006. 75с.
10. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною №1 К.: Мінрегіон України, 2014.
11. А.В. Радкевіч, І.І. Давидов, В.П. Чабан, К.А. Ковтун. Аналіз методів розрахунку на прогресуюче обвалення одноповерхових каркасних виробничих будівель та пошук можливостей підвищення точності розрахунків. Український журнал будівництва та архітектури, № 1 (019), 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.270224.122.1032>
12. Ротко С.В., Дудка С.С. Оцінка конструктивної схеми багатоповерхової виробничої будівлі на стійкість до прогресуючого обвалення у ПК SCAD // Інноваційні процеси в галузі дорожнього будівництва: збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих вчених та студентів (6 листопада 2024 р., м. Луцьк) – Луцьк: Луцький НТУ, 2024. – С. 78-81. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1o_оpa3hksqd3QCzy78yns-NxAOqcEhmR/view
13. Ротко, Задорожнікова, Мурафа, Рябий, Козак. Розрахунок конструкцій на стійкість до прогресуючого руйнування за допомогою програмного забезпечення. *Інновації у будівництві: зб. тез доп. IX Міжн. наук.-практ. інтернет-конф. здоб. вищої освіти та мол. уч., 14 травня 2024 р., м. Луцьк.* ЛНТУ, 2024. С. 63-65. <https://sites.google.com/view/iic-2024/тези-доповідей>