

РУЙНУВАННЯ, ЩО ПРОГРЕСУЄ: ІСТОРІЯ, ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО РОЗРАХУНКУ

*Ольховский І.А. ДМ-41-18, Сімбір'єв Д.О. ДМ-36т1-19
Науковий керівник: к.т.н., доцент Бережна К.В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

Термін руйнування, що прогресує, та формулювання проблеми захисту від нього панельних будівель з'явився в 1968 році в доповіді комісії, яка розслідувала причину відомої аварії 22 поверхового житлового дому Ronan Point що в Лондоні. В будинку були виконані всі будівельні норми та правила, и було встановлено відсутність будівельних дефектів. Але прогресуюче руйнування було не уникнути, оскільки схема конструкції була аналогічною до карточного будиночку, тобто вона не мала ніякої можливості перерозподілити навантаження на окремі підсистеми і тим самим локалізувати відмову [1].

Трагічним прикладом прогресуючого руйнування є терористичний акт в Оклахомі, що стався 19 квітня 1995 року. В результаті вибуху замінованого автомобіля було зруйновано федеральну будівлю імені Альфреда Марра. Вибух зруйнував або пошкодив 324 будівлі в радіусі 16 кварталів, знищив 86 автомобілів і вибив шибки будинків в радіусі 4,5 км.

Найвідомішим прикладом прогресуючого руйнування є теракт 11 вересня 2001 року. Як відомо 2 всесвітніх торговельних центра були повністю зруйнованими внаслідок терористичної атаки, а саме пілотування в них 2-ох захоплених терористами літака.

Для цієї будівлі інженери застосували прогресивну структурну модель: план поверху являє собою периметр з близько розташованих колон з внутрішньої ліфтової середньої частини (рис. 1). Поверхи підтримуються серіями легких ферм, які розташовуються між зовнішніми колонами і

ліфтовою частиною. Вежі близнюки були першими надвисокими будівлями, спроектованими без кам'яної кладки.

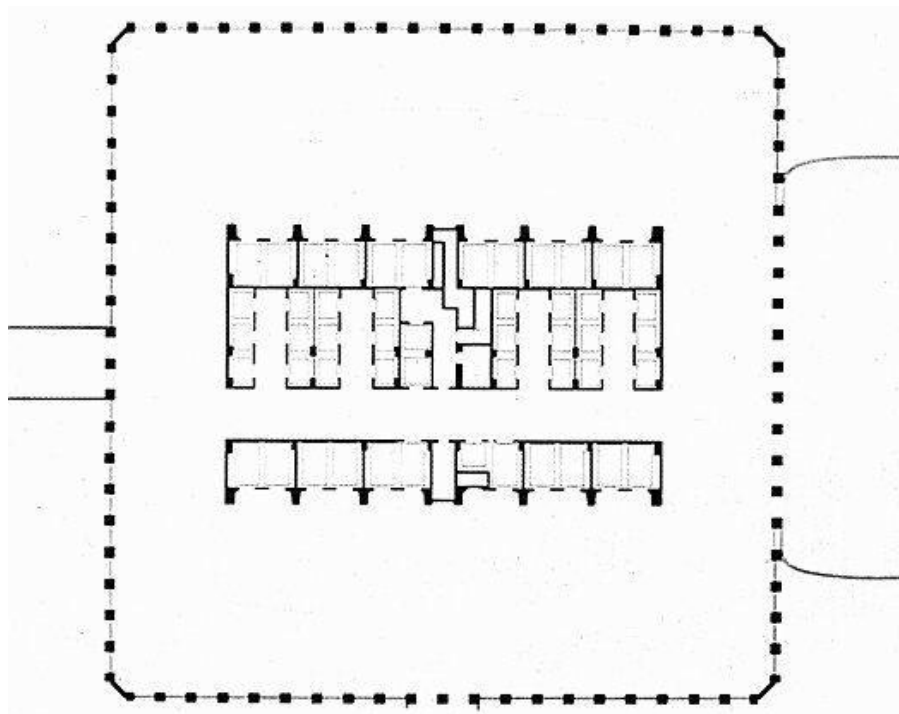


Рисунок 1 – Типовий план поверху всесвітнього торгівельного центру

Після удару літака більшості спостерігачів здавалося, що конструкція сильно пошкоджена, але не обов'язково фатально. Ударом літака було зруйновано значну кількість колон периметра на кількох поверхах будівлі, що сильно послабило всю систему. Спочатку цього виявилось недостатньо, щоб викликати обвалення. Але втрата міцності і пружності матеріалів під впливом вогню в поєднанні з впливом пошкоджень могли стати причиною руйнування системи ферм, що підтримують поверх, або інших колон периметра або навіть центральної частини, або і того і іншого. Руйнування поверхової ферми дозволило б колонам периметра здвинутися назовні. Незалежно від інших подій, що відбулися, в результаті все це повинно було закінчитися повним руйнуванням принаймні одного поверху на даному рівні. А якщо один поверх був зруйнований - всі поверхи вище почали падіння. Величезна маса падаючої будови створювала зусилля, що руйнувало до цього неушкоджені поверхи

внизу, результатом чого стало катастрофічне руйнування будівлі в цілому (рис. 2-3) [2].



Рисунок 2 – Початок падіння
однієї з веж

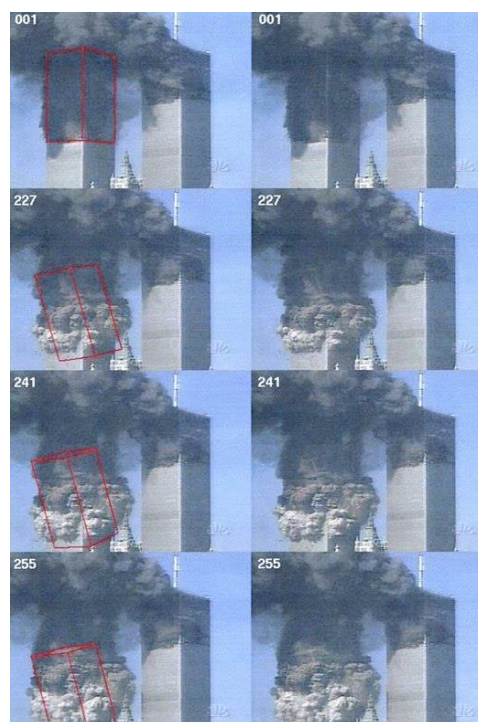


Рисунок 3 – Послідовність
прогресуючого руйнування

Термін «прогресуюче руйнування» відноситься до ситуації, коли руйнування або пошкодження будь-якої малої частини конструкції веде до повного або майже повного руйнування всієї конструкції. Аварійні впливи або ситуації можуть бути викликані діяльністю людини (вибухи газу, теракти, пожежі, наїзди транспорту, дефекти проектування, будівництва та експлуатації будівель, некваліфікована реконструкція з надбудовою, прибудовою, переплануванням приміщень, супроводжувана ослабленням або перевантаженням несучих елементів і підстав) або природними явищами (землетруси, урагани, зсуви, нерівномірні деформації підстав). Оскільки неможливо повністю виключити ймовірність виникнення таких ситуацій, необхідно забезпечити певну ступінь безпеки людей і збереження їх майна за

рахунок зменшення ймовірності прогресуючого обвалення при локальних руйнування несучих конструкцій [3].

В США з різних нормативів можна виділити три різних варіанти пояснення цього терміну: прогресуюче обвалення (progressive collapse) - поширення початкового локального руйнування від елемента до елемента конструктивної системи, в результаті чого відбувається обвалення всієї будівлі (спорудження) або непропорційно великий його частини [4]; прогресуюче обвалення - поширення локального руйнування (пошкодження), викликаного ініціруючим подією від елемента до елемента конструктивної системи, внаслідок чого відбувається обвалення всієї будівлі або непропорційно великої її частини; також відомо як непропорційне (Disproportionate) обвалення [5]; прогресуюче обвалення - розрахункова ситуація, в якій локальне руйнування головних (мають першорядне значення) конструктивних елементів призводить до обвалення сусідніх елементів, які, в свою чергу, викликають додаткове обвалення [6-8].

У світі існує багато нормативних документів з питань прогресуючого руйнування.

В США:

- UFC 4-023-03 (Including Change 2, June 2013) Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse.
- GSA "Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance", October 2013.
- Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. NIST, February 2007
- Rules and Regulations of the Building Code of the City of New York. См. chapter 18 "Resistance to Progressive Collapse under Extreme Local Loads"
- ASCE/SEI 7-10 (издание 2010 г.) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

В Європейському Союзі:

- EN 1991-1-7-2009 General Actions – Accidental Actions или ТКП EN 1991-1-7-2009 (02250)

- EN 1992-1-1-2009 Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1

В Великобританії:

- BS 5950-1:2000 (издание 2008 г.: Incorporating Corrigenda Nos. 1 and 2 and Amendment No. 1) Structural use of steelwork in building

- BS 8110-1:1997

- BS 8110-2:1985

- BS 5628-1:2005 Code of Practice for Use of Masonry

В Канаді:

- NBCC 1977 National Building Code of Canada (NBCC), Part 4, Commentary C, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, 1985.

- CSA Standard S16-01 Limit States Design of Steel Structures. См. п. 6.1.2 Structural Integrity.

В Гон-Конзі:

- Code of practice for structural use of concrete, – 2013. См. п. 2.2.3.2 Check of structural integrity, п. 2.3.2.7 Fire, п. 6.4 Design for robustness against disproportionate collapse.

- Code of practice for structural use of steel, – 2011

- Code of Practice for Dead and Imposed Loads, – 2011

Та в Австралії:

- AS/NZS 1170.0:2002 Structural design actions. Part 0: General principles

Якщо виділити основну інформацію з ДБН В.1.2-14-2009 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ», то це перелік вимог, яким мають відповідати будівельні конструкції та основи. А саме:

- сприймати без руйнувань і недопустимих деформацій впливи, що виникають під час їх зведення і протягом встановленого терміну експлуатації;

- мати достатню роботоспроможність в умовах нормальної експлуатації протягом усього встановленого терміну експлуатації, а саме: їх експлуатаційні

параметри (переміщення, вібрації тощо) із заданою імовірністю не повинні виходити за встановлені нормативною або проектною документацією межі, а їх довговічність повинна бути такою, щоб погіршення властивостей матеріалів і конструкцій внаслідок гниття, корозії, стирання та інших форм фізичного зношування не призводило до недопустимо високої ймовірності відмови;

- мати достатню живучість по відношенню до локальних руйнувань і передбачених нормами аварійних впливів (пожеж, вибухів, наїздів транспортних засобів тощо), виключаючи при цьому явища прогресуючого руйнування, коли загальні пошкодження виявляються значно більшими ніж первісне збурення, що їх викликало [9].

Щодо запобігання нестандартних аварійних ситуацій, безпека об'єкта, як правило, повинна забезпечуватися шляхом реалізації принципу ешелонування захисту, який базується на використанні бар'єрів, які послідовно включаються в роботу та функціонують незалежно один від іншого і виконують такі функції:

- перешкоджають виникненню перевантажень, збоїв і аварійних ситуацій;

- забезпечують сприйняття аварійних перевантажень і гарантують незруйнованим, а також функціонування (можливо з погіршенням параметрів якості або після ремонту) основної частини об'єкта;

- перешкоджають лавиноподібного розвитку руйнувань і відмов, а також локалізують наслідки вже аварії, що сталася.

При проектуванні будівель та споруд, що належать до класу відповідальності ССЗ, категорії відповідальності А, категорії складності IV-V, потрібно враховувати можливість виникнення форс-мажорних ситуацій, поява яких ймовірна у процесі життєвого циклу системи (конструкції).

У даному випадку при проектування необхідно виконувати розрахункову оцінку збереження від обвалення несучих конструкцій висотного будинку у разі виникнення надзвичайних ситуацій (пожежі або

вибуху), яка може призвести до локального руйнування в обсягах для висотних будинків із залізобетонним каркасом:

- руйнування (видалення) двох стін, що перетинаються, на ділянках від місця їх перетину (наприклад, від рогу будинку) до найближчого отвору в кожній стіні або до наступного вертикального перетину зі стіною іншого напрямку на сумарній довжині не більше 10 м, що відповідає руйнуванню конструкцій у колі площею 80 м² (площа локального руйнування);

- руйнування (вилучення) окремої колони (пілона) або колони (пілона) з прилеглими до них ділянками стін, розміщених на одному поверсі на площі локального руйнування;

- обвалення ділянки перекриття одного поверху на площі локального руйнування.

До основних конструктивних заходів, які рекомендовано вживати для забезпечення стійкості висотного будинку із залізобетонним каркасом від прогресуючого обвалення, належать:

- створення безперервності перекриттів та забезпечення безперервності армування конструкцій у плані та по висоті;

- застосування подвійного безперервного армування перекриттів у верхній та нижній зонах із загальною площею в обох напрямках не нижче ніж 0,25 % від площі перерізу бетону;

- підсилення (у разі необхідності) сусідніх вертикальних несучих конструкцій, на які може передаватись навантаження від зруйнованого елемента;

- надійне стикування й анкерування арматури у місцях з'єднання стін, колон та перекриттів.

Для висотного будинку з металевим несучим каркасом задля запобігання прогресуючому обваленню рекомендовано:

- застосовувати конструктивні схеми каркасів із жорсткими вузлами з'єднань ригелів з колонами для перерозподілу зусиль при руйнуванні;

- надавати перевагу зменшеному кроку периферійних фасадних колон;

- передбачати відповідні аутригерні системи для перерозподілу зусиль;
- застосовувати комбіновані сталезалізобетонні несучі системи з улаштуванням залізобетонних каркасів у найбільш небезпечних для прогресуючого руйнування зонах нижніх поверхів.

Руйнування будинків, несучі конструкції яких проектуються з металевим каркасом, необхідно розглядати за спеціальними сценаріями, в яких руйнування (вилучення) окремих елементів слід призначати в найбільш небезпечних місцях залежно від прийнятої конструктивної схеми і відповідно до оцінок можливих ризиків.

Конструкції будинку рекомендовано розраховувати як просторову систему «основа – фундамент – споруда» з використанням програмних комплексів, що дозволяють урахувати фізичну й геометричну нелінійність. А також забезпечити найбільшу точність результатів розрахунку й зниження додаткових матеріаловитрат.

Рекомендовано проводити розрахунок за такою схемою:

- виконують розрахунок усієї схеми в фізично нелінійній постановці на постійні й тимчасові навантаження, що входять до аварійного сполучення;
- отриманий напружено-деформований стан приймають як стартовий для розрахунку на навантаження від елементів, що вилучаються;
- розрахунок на додаткове навантаження, що виникає при вилученні елементів, виконують у фізично й геометрично нелінійній постановці. Навантаження від вилучення елементів відповідає зусиллям, отриманих у них на попередньому етапі розрахунку і збільшених на коефіцієнт динамічності 1,2. Перевірку на міцність елементів, що залишилися, виконують без урахування поздовжнього вигину.

Таким чином, розрахунок міцності та стійкості проводять на аварійне сполучення навантажень і впливів, що включає постійні і тривалі тимчасові навантаження, а також вплив на конструкцію будинку локальних гіпотетичних обвалень. Локальне обвалення може бути розташоване в будь-якому місці будинку.

Ефективним методом аналізу конструктивної системи при розрахунку на прогресуюче обвалення є побудова її енергетичного портрета. Алгоритм дій для цього складається із таких процедур:

- побудова з урахуванням фізичної і/або геометричної нелінійності поля граничної щільності енергії деформації (ГЩЕД) в елементах системи;
- на основі аналізу побудованого поля ГЩЕД, встановлення елементів з максимальними її значеннями;
- забезпечувати достатність довжини анкерування арматури при її роботі як в'язів зсуву;
- опорні перерізи балок і ригелів, а також вузли їх з'єднань із колонами (стінами, пілонами) повинні мати міцність за поперечною силою в 1,5 разу вище, ніж їх несуча здатність за вимогами у прольоті з урахуванням пластичних властивостей [10].

В посібнику [11] наведені основні вимоги до побудови розрахункових моделей:

1 Для розрахунку споруд на стійкість проти прогресуючого обвалення слід використовувати просторову розрахункову модель, в якій враховується взаємодія з ґрунтовою основою. У розрахунковій моделі слід враховувати можливе включення в роботу елементів, які за нормальних умов експлуатації споруди є ненесучими (наприклад, навісні зовнішні стінові панелі, парапети, залізобетонні огорожі балконів, перегородки і т.п.), а при локальному руйнуванні активно беруть участь в перерозподілі зусиль в елементах конструктивної системи.

2 При розрахунку споруд на стійкість проти прогресуючого обвалення слід передбачати можливість стадійного розрахунку. На початковій стадії необхідно визначити напружено-деформований стан конструкцій за умов нормальної експлуатації. На наступних стадіях слід визначити напружено-деформований стан конструкцій, що виникає при локальному руйнуванні, за умови врахування деформацій конструкцій, що виникли в результаті нормальної експлуатації.

3 Розрахунок моделі споруди слід виконувати для кожного з розглянутих локальних руйнувань окремо і незалежно від інших можливих локальних руйнувань.

4 В розрахунковій моделі споруди слід враховувати реальну діаграму роботи матеріалу конструкцій і їх стиків (розшарування цегляної кладки при роботі конструкції на розтяг; несприйняття в платформенном стику напруг, що розтягують, крихке руйнування конструкцій і вузлів їх сполучення і т.п.).

5 Розрахунок споруди на стійкість проти прогресуючого обвалення слід проводити за деформованою схемою з урахуванням вимог, викладених в п.4.

6 У разі забезпечення пластичної роботи конструктивної системи в граничному стані, розрахунок на стійкість проти прогресуючого обвалення можливо проводити кінематичним методом теорії граничної рівноваги. У цьому випадку розрахунок при кожній обраній схемі виконується за такою процедурою:

- задаються найбільш ймовірні механізми руйнування елементів споруди, які втратили опору (задати механізм руйнування, значить визначити всі руйнування зв'язку, в тому числі і створені пластичні шарніри, і знайти можливі узагальнені переміщення (w_i) у напрямку зусиль в цих зв'язках);

- найбільш ймовірному механізму руйнування відповідає мінімум потенційної енергії конструкції на можливих (узагальнених) переміщеннях;

- для кожного з обраних механізмів руйнування слід визначити граничні зусилля, які можуть бути сприйняті перетинами всіх пластично зруйнованих елементів і зв'язків (S_i), в тому числі і пластичних шарнірів;

- знаходяться рівнодіючі (G_i) зовнішніх сил, прикладених до окремих ланок механізму, тобто до окремих не зруйнованих елементів або їх частин, і переміщення по напрямку їх дії (u_i);

- визначаються роботи внутрішніх сил (W) і зовнішніх навантажень (U) на можливих переміщеннях розглянутого механізму

$$W = \sum S_i w_i$$

$$U = \sum G_i u_i$$

- перевіряється умова рівноваги $W \geq U$.

Якщо при будь-якій розрахунковій схемі умова рівноваги не виконується, то слід зробити посилення конструктивних елементів, або іншими заходами домогтися його виконання.

Крім того, в несучих вертикальних елементах, що не розташовані над локальним руйнуванням, його вплив призводить до збільшення напруги і зусиль. Необхідно виконати перевірку несучої здатності цих елементів.

У деяких випадках доцільно розглядати роботу перекриттів над віддаленою колоною (пілоном, стіною) при великих прогинах як елементів висячої системи, при конструктивній можливості сприйняття виникаючих горизонтальних зусиль.

Основні положення при розрахунку споруд на прогресуюче руйнування

По-перше, конструктивна система будинку повинна бути захищена від прогресуючого обвалення в разі локального руйнування її несучих конструкцій при аварійних впливах, не передбачених умовами нормальної експлуатації будівлі (вибухи, пожежі, ударні впливи транспортних засобів і т.п.).

Ця вимога означає, що в разі аварійних впливів допускаються локальні руйнування несучих конструкцій, але ці первинні руйнування не повинні призводити до обвалення або руйнування конструкцій, на які передається навантаження, раніше сприймалася елементами, пошкодженими аварійним впливом.

Конструктивна система будівлі повинна забезпечувати його міцність і стійкість у разі локального руйнування несучих конструкцій, як мінімум, на час, необхідний для евакуації людей.

Розрахунок будівлі в разі локального руйнування несучих конструкцій проводиться тільки за граничними станами першої групи. Розвиток непружних деформацій, переміщення конструкцій і розкриття в них тріщин у розглянутій надзвичайної ситуації не обмежуються.

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

Способи захисту від прогресуючого обвалення панельних будинків, для каркасних будинків трактуються інакше і в загальному випадку - не застосовні.

Друге, при проектуванні захисту будівель від прогресуючого обвалення слід виділяти два типи непошкоджених конструктивних елементів:

- в елементах першого типу впливу локальних руйнувань не викликають якісної зміни напруженого стану, а призводять лише до збільшення напружень і зусиль;
- в елементах другого типу (до них відносяться конструкції, що втратили початкові опори розташовані над локальним руйнуванням) в розглянутому стані будівлі якісно змінюється напружений стан.

Література:

1. Pearson Cynthia, Delatte Norbert. Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes.—ASCE, 2005 – 7 p.
2. WorldTradeCenterBuildingPerformanceStudy: DataCollection, PreliminaryObservations, andRecommendations.—,NewYork.: FederalEmergencyManagementAgency (FEMA),2002.— 403 p.
3. Перельмутер А. В. Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного

- комплекса SCADOffice / Перельмутер А. В., Криксунов Э. З., Мосина Н. В. – М., 2008.
4. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Building, NISTIR 7396. – New York, 2007. – 9 p.
 5. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE 7-02. – ASCE, Reston, VA 20191-4400, 2000.
 6. Design of Building to Resist Progressive Collapse: UFC-4-023-03. – 2005. – (Unified Facilities Criteria)
 7. Structural Use of Concrete, Part 1. Code of Practice for Design and Construction: BS5950-1:2000. – 389 Cheswick High Road, London W4 4AL, 1998.
 8. General Services Administrations (GSA), Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernizations Projects – 2003.
 9. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – [Чинний від 2009-12-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Державні будівельні норми).
 10. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В.2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СНиП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) / [Бабаєв В. М., Бамбура А. М., Пустовойтова О. М., Резнік П. А. та інш.]; за аг. Ред. В.С. Шмуклера. – Харків : Золоті сторінки, 2015. – 208 с.
 11. А.В. Кузьмин, С.Г. Емельянов, Н.В. Федорова Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Общие положения. – Москва: 2017 — 30 с.