

УДК 624.04.001.57 (045)

*М.С. Барабаш, к.т.н., НАУ;  
Ю.В. Гензерський, ТОВ "ЛІРА САПР";  
Я.В. Покотило, НАУ*

## МЕТОДИ МІНІМІЗАЦІЇ ЙМОВІРНОСТІ ПРОГРЕСУЮЧОГО РУЙНУВАННЯ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ ПРИ ДІЇ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ\*

### АНОТАЦІЯ

У статті наведено класифікацію можливих типів прогресуючого обвалення, проаналізовано ознаки прогресуючого обвалення, визначена ймовірність руйнування конструктивної системи при настанні особливої ситуації, запропоновані методи мінімізації ймовірності прогресуючого обвалення.

Ключові слова: прогресуюче руйнування, надграничний стан, непропорційне обвалення, локальне руйнування, надійність конструкцій

Прогресуюче руйнування (англ. Progressive Collapse) є відносно новим терміном в теорії конструкцій і має ряд визначень, що містяться в науково-технічній літературі [3-8, 10].

Встановлено, що головною ознакою прогресуючого руйнування прийнято вважати непропорційно великі масштаби остаточного пошкодження будівлі та відповідно збитку по відношенню до локального пошкодження (обвалення) окремого конструктивного елемента (або групи конструктивних елементів), що ініціювали ланцюгову реакцію обвалення. Слід зазначити, що у такого підходу існують як прихильники, так і опоненти, які відстоюють, головним чином, питання термінології.

Беручи до уваги ту обставину, що будь-яке руйнування є певною мірою "прогресуючим", деякі автори та нормативні документи пропонують використовувати термін "непропорційне обвалення" аби взагалі не акцентувати уваги на цьому терміні.

Так, наприклад, в європейській практиці нормування, на відміну від американської, відсутній документ, що безпосередньо регламентує розрахунок конструктивних систем на прогресуюче обвалення, але разом з тим цей феномен враховується в ТКП ЄП 1991-1-7 "Загальний вплив — Особливі

впливи" (EN 1991-1-7: General Actions — Accidental Actions) в рамках перевірки живучості конструктивної системи в особливій розрахунковій ситуації при врахуванні розрахункового мінімуму вертикальних і горизонтальних зв'язків.

Практика аналізу катастроф свідчить про те, що вони часто відбуваються з будівлями і спорудами, які добротно спроектовані і побудовані, їх основні конструкції розраховані на вплив надмірних навантажень. Катастрофічний вплив може викликати принципову зміну розрахункової схеми споруди і одночасно з цим роботу несучих конструктивних елементів у надграничному стані, не передбаченому діючими нормативами. У зв'язку з цим виникає проблема регламентування цього надграничного стану.

Пропонується класифікація можливих типів прогресуючого обвалення:

1) прогресуюче обвалення: один або кілька елементів конструктивної системи руйнуються раптово (незалежно від причин, що викликали руйнування), що веде до перерозподілу зусиль та чергового виключення (руйнування) інших конструктивних елементів до тих пір, поки не буде досягнуто новий стан рівноваги, при якому частина конструктивної системи, якщо не вся будівля, піддається обваленню;

2) непропорційне обвалення: прогресуюче обвалення характеризується як непропорційне, якщо розміри області результуючого обвалення перевищують допустимі, встановлені відповідними нормами, стандартами, рекомендаціями. У силу цього, критерій непропорційності може відрізнитися для різних країн залежно від прийнятого рівня допустимого ризику [1, 2].

Таким чином, "прогресуюче обвалення" має наступні ознаки:

— реалізація аномальної події, що викликає появу особливих (ідентифікованих і / або неідентифікованих) впливів;

— раптове локальне руйнування окремого(их) конструктивного(их) елемента(ів), що провокує лавиноподібне обвалення значної частини конструктивної системи;

— непропорційно великі масштаби результуючого обвалення і соціально-економічні наслідки по відношенню до його локального руйнування, що перевершують допустимі значення, встановлені в залежності від прийнятого рівня допустимого ризику.

\*Кольорові рисунки 1, 2, 3 до статті див. на стор. 37

Слід зазначити, що в більшості випадків сценарії розвитку прогресуючого обвалення пов'язують, головним чином, з перерозподілом зусиль у модифікованій конструктивній системі, що отримала початкові руйнування. Однак в особливих розрахункових ситуаціях можуть реалізовуватися і інші механізми та сценарії поширення руйнувань.

Відомо, що прямим шляхом збільшення надійності конструкції є зниження ступеня ризику. У систему диференційованих коефіцієнтів безпеки входить коефіцієнт надійності за призначенням, який іноді називають коефіцієнтом забезпеченості. При застосуванні цього коефіцієнта зі значенням 1,1-1,2, як це рекомендовано нормами проектування висотних будівель, ми збільшуємо опір вузлів і перетинів каркаса, але це майже не впливає на його здатність чинити опір прогресуючому руйнуванню. Тим не менше, надійність конструкції при експлуатаційних впливах помітно зростає. Користуючись апаратом теорії ризику, можна прогнозувати надійність незруйнованості при наперед заданому відносному запасі несучої здатності.

У різних країнах прийняті нормативними документами різні критеріальні значення для обмеження області результируючого обвалення. В Україні у ДБН В.2.2-24 (додаток Е) прийняті такі критерії обмеження області локального руйнування:

- у горизонтальному напрямку:  
обвалення ділянки перекриття одного поверху на площі локального обвалення;
- у вертикальному напрямку:  
обвалення (видалення) окремої колони (пілону) або колони (пілону) з прилеглими до них ділянками стін, розміщених на одному поверсі на площі локального обвалення;
- обвалення (видалення) двох стін, що перетинаються, на ділянках від місця їх перетину (наприклад, від кута будинку) до найближчого отвору в кожній стіні або до наступного вертикального перетину зі стіною іншого напрямку;
- у всіх випадках площа поперечного перерізу всіх вилучених вертикальних елементів, розташованих на ділянці 80 м<sup>2</sup>, не повинна перевищувати для залізобетонних елементів 0,9 м<sup>2</sup>, для фібробетонних елементів 0,7 м<sup>2</sup>, для жорсткої арматури 15 %;

Як впливає з аналізу робіт [3-7, 10], локальні руйнування (пошкодження) можуть бути ініційовані цілим рядом аномальних причин (подій), включаючи як людські помилки, допущені в про-

цесі проектування і зведення будівлі, так і події, які можуть статися з малою ймовірністю після його зведення в процесі експлуатації, але не розглядаються в постійних та перехідних розрахункових ситуаціях при складанні відповідних поєднань ефектів від можливих пошкоджень при традиційному проектуванні. Такі події пов'язані з появою, як правило, аномальних впливів, які традиційно прийнято називати особливими. Ці дії, до яких відносяться вибухи (газу, бомби тощо), удари транспортних засобів (вантажівки, літака), великомасштабні пожежі, екстремальні кліматичні чи інші аномальні природні впливи, не розглядаються в рамках традиційного проектування. У загальному випадку стратегія управління ризиками в особливих розрахункових ситуаціях фокусується на здатності пошкодженої (модифікованої) конструктивної системи зберігати живучість після настання особливої події, пов'язаної з появою аномального впливу. Якщо кожен із загроз, обумовлених раніше, представити випадковою подією  $H_i$ , тоді повна ймовірність обвалення конструктивної системи при реалізації особливої події може бути записана наступним чином:

$$P(F) = \sum_{i>1} P(F/DH_i)P(DH_i/H_i)P(H_i), \quad (1)$$

де  $F$  — подія, що визначається як непропорційне або прогресуюче обвалення конструктивної системи;

$P(F/DH_i)$  — умовна ймовірність обвалення конструктивної системи за умови, що відбудеться локальне руйнування окремого елемента при реалізації особливої події  $H_i$

$P(DH_i/H_i)$  — умовна ймовірність локального руйнування окремого конструктивного елемента при реалізації особливої події;

$P(H_i)$  — ймовірність появи особливої події, пов'язаної із загрозою.

Терміном  $P(F)$  позначена повна ймовірність обвалення будівлі, яку слід обмежувати деяким соціально прийнятним значенням (у більшості норм  $P(F) \approx 10^{-7}/\text{год}$ ).

Однією з основних проблем, з якою стикаються сучасні норми, — це те, що вони фокусують увагу на традиційному, історично виробленому відносно малому переліку загроз, які можуть впливати на будівлю (кліматичні та сейсмічні дії тощо). Сучасна будівельна практика показує зростання загроз, які історично не розглядалися як суттєві в процесі

проектування (наприклад, вибух або детонація) або виключалися швидше системою заходів безпеки ніж формальними конструкційними розрахунками.

Нескладно бачити, що зниження ймовірності настання непропорційного обвалення конструктивної системи може бути отримано зниженням або кожної окремої або всіх трьох ймовірностей, що входять у формулу (1). При цьому ймовірність  $P(H_i)$  при проектуванні є незалежною. Вона може контролюватися об'ємно-планувальним рішенням або розміщенням будівлі, зниженням можливих ризиків всередині будівлі при організованих заходах безпеки, навчанням персоналу тощо. При реалізації таких заходів багато ризиків можуть бути ефективно відвернені (наприклад, терористичні або кримінальні атаки). Проектна стратегія, спрямована на забезпечення опору локального руйнування, зводиться до мінімізації ймовірності  $P(D/H_i)$ . Як було показано раніше, ця стратегія може бути важко реалізованою (у силу невизначеності величини особливих впливів), містити значні ризики або давати неекономічні результати.

Приймаючи ситуацію після реалізації локального обвалення  $P(D/H_i)=1$ , повна ймовірність  $P(F)$  буде дорівнювати:

$$P(F)=P(F/DH_i)P(H_i), \quad (2)$$

Таким чином, задача проектування в особливій розрахунковій ситуації зводиться, головним чином, до мінімізації ймовірності. Ця стратегія повинна реалізовуватися в широкому діапазоні: від конструктивних заходів, спрямованих на створення нерозрізності і конструктивної цілісності системи, до повного розрахунку ушкоджень конструктивної системи з урахуванням ефектів, які не враховуються при традиційному проектуванні (наприклад, мембранні зусилля в перекриттях, великі деформації і переміщення, фізична і геометрична нелінійність).

У документах, що визначають правила проектування для запобігання прогресуючому обваленню, наприклад, "Рекомендації щодо захисту монолітних житлових будівель від прогресуючого обвалення", розроблені МНІИТЭП, НІИЖБ, ДБН В.2.2-24, вимоги для вирішення даної проблеми можна викласти таким чином.

1. Несуча конструктивна система житлових будинків повинна бути стійкою до прогресуючого (лавиноподібного, ланцюгового) обвалення в разі локального руйнування окремих конструкцій при

аварійних впливах (вибуху побутового газу, пожежі тощо).

2. Допускаються локальні руйнування окремих несучих конструкцій, але ці первинні руйнування не повинні призводити до обвалення сусідніх конструкцій, на які передається навантаження, що сприймалось раніше елементами, пошкодженими в результаті аварійного впливу.

3. Конструктивна система будинку повинна забезпечувати його міцність і стійкість, як мінімум на час, необхідний для евакуації людей. Переміщення конструкцій і розкриття тріщин в них не обмежуються.

4. Стійкість до прогресуючого обвалення перевіряється нелінійним розрахунком на особливе (аварійне) поєднання навантажень і впливів, у тому числі постійні, тривалі, короткочасні навантаження, а також вплив гіпотетичних локальних руйнувань несучих конструкцій.

Допускається в першому наближенні після визначення зони локального обвалення виконувати розрахунок конструкцій з урахуванням демонтажу зруйнованих елементів при знижених модулях пружності несучих елементів: вертикальних з коефіцієнтом — 0,6Е0, плит перекриття (покриття)-0,3Е0.

5. Коефіцієнти надійності за навантаженням слід приймати за одиницю. За розрахункові характеристики матеріалів приймаються їх нормативні значення. Крім того, розрахункові опори множать на підвищувальні коефіцієнти умов роботи, що враховують малу ймовірність аварійних впливів і зростання міцності бетону після зведення будівлі, а також можливість роботи арматури за межею пружності. Така можливість введення поправочних коефіцієнтів до міцності матеріалу та модуля пружності на різних стадіях монтажу і демонтажу реалізована в розрахунковому процесорі ЛПРА-МОНТАЖ.

6. Рекомендується використовувати програмні комплекси (ПК), в яких реалізовано процедури розрахунку конструкцій з урахуванням фізичної і геометричної нелінійності та процесів моделювання життєвого циклу (наприклад, такі як ЛПРА-СТЕП, ЛПРА-МОНТАЖ +, Динаміка +, ЛПРА-грунт, Варіація моделей тощо).

При реалізації розрахунків на прогресуюче обвалення необхідно брати до уваги умовність вихідних передумов, що полягає в наступному:

- відсутня достовірна інформація про місце і

причини виникнення процесу і характер його руйнування;

- реальні параметри граничних руйнівних характеристик матеріалів, як правило, відрізняються від умов міцності, прийнятих в нормах, тому в розрахункових комплексах, наприклад, таких як фізично-нелінійний ЛІРА-СТЕП, крім нормованих даних про матеріали (бетон, арматура), передбачається завдання довільних розрахункових значень параметрів міцності (в тому числі за результатами натурних спостережень).

Таким чином, у результаті чисельного моделювання можна отримати якісну оцінку характеристик стійкості конструкції по відношенню до прогресуючого обвалення, а також зіставити кілька можливих сценаріїв обвалення з метою виявлення слабких місць конструкції.

Оскільки передбачити всі можливі варіанти аварійних впливів неможливо, тому ключовим пунктом у розрахунках на аварійне обвалення є вибір і затвердження спільно з конструктором і замовником можливих сценаріїв обвалення, максимально наближених до реальних умов розташування об'єкта на місцевості, наприклад:

при розташуванні поряд з транспортними шляхами розрахунок споруди виконується при видаленні крайніх колон;

за наявності вертолітного майданчика розрахунок виконується на обвалення ділянки плити;

за наявності у споруді або поруч газорозподільних станцій виконується розрахунок на вибух газу;

при влаштуванні підпірних стін та інших захисних споруд розрахунок виконується на руйнування ділянки цих споруд. При цьому враховуючи вимоги ДБН В.2.2-24 (додаток Е), допускається руйнування окремих елементів на площі до  $80\text{м}^2$ :

- переріз видалених ЖБ елементів не повинен бути більше  $0,9\text{м}^2$ , що означає, що пілон перерізом  $0,4 \times 2,3\text{м}$  не може бути повністю зруйнований;

- переріз видалених фібробетонних елементів повинен бути не більше  $0,7\text{м}^2$ ;

переріз видаленої жорсткої арматури не повинен бути більше 15%;

- перекриття висотної споруди має бути розраховане на сприйняття ділянки вище розташованого перекриття площею до  $80\text{м}^2$  з коефіцієнтом динамічності 1,5.

Оскільки у багатьох дослідженнях відзначається, що неможливо запроектувати і побудувати спо-

руду абсолютно безпечною і при цьому не враховувати вартість запобігання аварійним ситуаціям, необхідно прагнути вирішувати ці питання найбільш економічними способами, в тому числі:

застосуванням раціональних конструктивно-планувальних рішень з урахуванням можливих аварійних ситуацій. Так, наприклад, в приміщеннях з газовим обладнанням — установленням газоаналізуючих датчиків і клапанів скидання можливого надлишкового тиску тощо;

використанням спеціальних технічних рішень визначають вогнестійкість (достатній захисний шар бетону, застосування спеціальних покриттів конструкцій), забезпеченням сейсмічної стійкості споруди за рахунок застосування демфуючих пристроїв тощо;

використанням матеріалів і конструктивних рішень, що забезпечують розвиток в елементах конструкцій і з'єднань пластичних деформацій;

забезпеченням достатньої довжини анкерування арматури для її роботи як зв'язків при зсуві;

забезпеченням мінімальної площі поздовжньої і поперечної арматури в покриттях і перекриттях, яка повинна бути не менше 0,25% від площі бетону.

При розрахунку будинків на сейсмічні впливи за ДБН В.2.2-24 і за синтезованими акселерограмами необхідно враховувати реальну фізично нелінійну роботу залізобетону з тріщинами, інакше при лінійному розрахунку ми отримуємо суттєво завищені зусилля в елементах конструкцій.

Розглянемо реальний приклад оцінки несучої здатності будівель при аварійних ситуаціях

1. Для проектного багатоповерхового житлового та громадського будинку ( $H = +128\text{ м}$ ,  $H$  підвалу  $= -14\text{ м}$ ) розглянуті варіанти:

- руйнування однієї з колон в середній проїзній частині будівлі;

- руйнування ділянки монолітної плити типового поверху.

У першому наближенні виконуємо розрахунок плити в лінійній постановці із заниженим модулем пружності  $0,3E_0$  та додатковим навантаженням  $0,75\text{тс/м}^2$  на площі  $10\text{м}^2$  від обвалення вищерозташованої плити. Оскільки отримане в цьому випадку армування (нижнє  $= 15,7\text{см}^2$  (рис.4) перевищує прийняте в плиті нижнє армування — крок  $100 \times 100 \varnothing 12\text{мм} = 11,31\text{см}^2$ , — переходимо до перевірки плити у фізично нелінійній постановці (рис.1).

У результаті нелінійного розрахунку отримані максимальні деформації плити складають — 60мм. Схема розвитку тріщин у плиті наведена на рис 2.

При нелінійному розрахунку плити розрив арматури і лавиноподібного зростання деформацій плити не зафіксовано, тому можна зробити висновок, що повного руйнування плит за даною схемою армування не буде.

Щодо конструктивних рішень, які можуть зменшити ймовірність обвалення конструктивної системи за умови, що відбудеться локальне руйнування окремого елемента при реалізації особливої події, то одним з найбільш раціональних та практичних методів є додавання до всієї конструкції аутригерних поверхів.

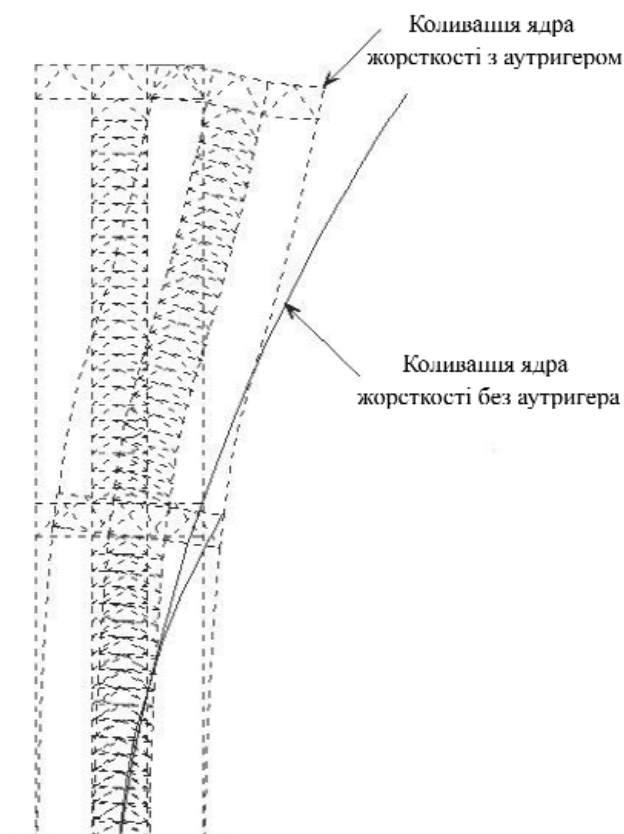
Особливістю цієї конструкції є те, що вона збільшує загальну жорсткість будівлі. Це досягається розміщенням на певному поверсі просторових ферм, які з'єднують ядро жорсткості з зовнішнім периметром колон.

При такому підході важливим фактором є розташування аутригерного поверху.

Для кожної будівлі розташування "жорсткого" поверху визначається окремо в залежності від його архітектурних та геометричних властивостей, але найбільш доцільним розташуванням є від 2/5 до 3/5 від висоти всієї будівлі при додаванні одного такого поверху.

При порівнянні моделей багатоповерхового будинку з жорстким поверхом та без нього загальна жорсткість будівлі зростає, що позитивно впливає на здатність цього будинку витримувати прогресуюче обвалення.

Колони є ключовими елементами будівель і споруд каркасного типу. При регулярній сітці осей руйнування колони призводить до збільшення прольоту конструкції над зруйнованою колоною в два рази. Момент в перетині конструкції над зруйнованою колоною може зрости до чотирьох разів. Прямий підхід до захисту таких конструкцій від прогресуючого обвалення, описаний в різних нормативних документах, в тому числі і зарубіжних [3, 4], призводить до збільшення витрати арматури в згинальних елементах в 2,5 — 3 рази. Беручи до уваги те, що неможливо заздалегідь знати місце первісного руйнування, збільшення армування всіх згинальних елементів в 2,5 рази призведе до значного подорожчання вартості будівництва. Таке рішення не раціональне.



**Рис. 4.** Порівняльна схема загальної жорсткості будинку з аутригерним поверхом та без нього

Як спосіб, що дозволяє захистити каркасні будівлі від обвалення без значного збільшення витрат матеріалів, пропонується використання жорстких блоків (аутригерних поверхів) по висоті будівлі. Такі блоки можуть бути суміщені, наприклад, з технічними поверхами висотних будівель. Колони каркаса при цьому слід розраховувати не тільки на відцентровий стиск при їх нормальній роботі, але і на розтяг, що виникає під час надзвичайної ситуації. Це можливо, тому що при розрахунку на прогресуюче обвалення не враховуються деформації елементів, а, отже, можна враховувати роботу арматури колони аж до досягнення в ній значень напруг, рівних тимчасовому опору сталі розтягання. У такому випадку стіни жорсткого блока починають працювати як балки-стілки, сприймаючи зусилля від розтягнутої колони, а перекриття поверхів виявляються підвішеними. Такий підхід дозволяє значно знизити обсяг руйнування конструкцій (рис. 3).

Таким чином, ретельний розрахунковий аналіз дозволяє розкрити додаткові резерви несучої здатності при певних конструктивних заходах, що вимагають лише невеликого збільшення матеріа-

ломісткості, і можна забезпечити стійкість до прогресуючого руйнування. Ще раз потрібно відзначити, що при стійкості до прогресуючого руйнування завжди мається на увазі тільки локальне пошкодження. Його визначення, безумовно, залежить від типу конструкцій. Характер локальних пошкоджень може бути визначений в регламентуючих документах, а для конкретних відповідальних споруд, що не мають аналогів, визначений проектувальником і погоджений із замовником. У всякому разі, проектувальник завжди повинен думати про те, що трапиться, якщо з яких-небудь причин вийде з ладу якийсь елемент (не обов'язково найвідповідальніший) проектованої ним конструкції.

У висновку слід зазначити, що забезпечення стійкості конструкції до прогресуючого руйнування є частиною загальної проблеми живучості споруди. До цього відноситься проблема вогнестійкості несучих конструкцій, а також проблема задоволення вимог сейсмостійкості навіть у разі будівництва важливих споруд у сейсмічному районі. І навіть якщо загроза землетрусу недостатньо велика, було б доцільно використовувати підходи, характерні для забезпечення стійкості до прогресуючого руйнування, тобто допускаючи втрату експлуатаційних якостей, не допускати обвалення конструкції.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Городецкий О.С., Барабаш М.С. Исследование вопросов живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях. *Научно-технический журнал: Нові технології в будівництві*, 2010. — №2(20) — С.19 — 23.

2. Ellingwood, B. R. *Load and Resistance Factor Criteria for Progressive Collapse Design* / B. R. Ellingwood // *Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2005.*

4. Ellingwood, B. R. *Approaches for Design against Progressive Collapse* / B. R. Ellingwood, E. V. Leyendecker // *J. Struct. Div., ASCE 104 3*; 1978.- P. 413-423.

5. Ellingwood, B. R. *Acceptable risk bases for design of Structures* / B. R. Ellingwood // *Progress in Struct. Engrg. and Mat.* — 2001. — 2). — P. 170-179.

6. ДБН В.2.2-24:2009 "Проектування висотних житлових і громадських будинків". Мінбуд України, 2009

7. *Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Норми проектування* : ДБН В.1.2-14-2009. — К.: Мінбуд України, 2009

8. Барабаш М.С., Мисливець К.М. Аналіз надійності висотної будівлі з урахуванням ризику прогресуючого обвалення. *Науково-виробничий журнал "Будівництво України"*, 2010. — №5 — С. 37 — 41.

9. *Навантаження і впливи. Норми проектування* : ДБН В.1.2 — 2:2006. — К.: Мінбуд України, 2006.

10. Перельмутер, А. В. О нормировании уровня риска / А. В. Перельмутер // *Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт.* — № 2/14(530), апрель-июнь 2007 г. — С. 160-169.

#### АННОТАЦІЯ

В статті приведена класифікація можливих типів прогресуючого обрушення, проаналізовані ознаки прогресуючого обрушення, визначена ймовірність руйнування конструктивної системи при настанні особливих ситуацій, запропоновані методи мінімізації ймовірності прогресуючого обрушення.

Ключові слова: прогресуюче обрушення, запердельное состояние, непропорциональное обрушение, локальное разрушение, надежность конструкций

#### ANNOTATION

The article gives a classification of possible types of progressive collapse, analyzed signs of progressive collapse, the probability of failure is defined in structural system upon the occurrence of the special situation, propose methods of minimizing the probability of progressive collapse.

Keywords: progressive collapse, beyond boundary condition, disproportionate collapse, local destruction, the reliability of structures