

УДК 624.042.4+624.014.2+624.04

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.250226.55.1209

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РОЗВИТОК ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

ДАВИДОВ І. І.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

ЧАБАН В. П.², канд. техн. наук, доц.,

КОВТУН-ГОРБАЧОВА Т. А.³, канд. техн. наук, доц.,

КОВТУН К. А.⁴, асп.

^{1*} Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: i.i.davydov@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7687-2241

² Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: v.p.chaban@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0217-5504

³ Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

⁴ Кафедра технології будівельного виробництва та геодезії, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (0563) 73-15-44, e-mail: k.a.kovtun@ust.edu.ua, ORCID ID: 0009-0009-5457-0045

Анотація. У роботі досліджено вплив динамічних характеристик будівельних конструкцій на механізми розвитку прогресуючого обвалення. Показано, що власні частоти, форми коливань та рівень демпфування істотно впливають на характер поширення обвалення після первинного руйнування одного або кількох несучих елементів. На основі отриманих результатів сформульовано критерії оцінки вразливості конструкцій до прогресуючого обвалення з урахуванням їх динамічних характеристик. **Мета статті.** Метою дослідження є встановлення взаємозв'язку між динамічними характеристиками будівельної конструкції та механізмами розвитку прогресуючого обвалення. Особлива увага приділяється впливу власних частот, форм коливань та рівня демпфування на ймовірність збудження конструкції до стану втрати стійкості або подальшого руйнування. На прикладі чисельного аналізу будівлі зі сталевим каркасом показано, що існує пряма залежність між локальними пошкодженнями та перерозподілом жорсткості конструктивної системи. Аналіз змін динамічних характеристик дає змогу ідентифікувати потенційно небезпечні зони зі зниженим опором до прогресуючого руйнування. Для оцінки вразливості до обвалення доцільно визначати перші 3–5 власних частот коливань, відповідні форми коливань, а також показники демпфування. Значне зниження жорсткості призводить до локалізації коливань, зростання амплітуд і потенційного накопичення енергії. Якщо система не в змозі погасити коливання через недостатнє демпфування, можливе каскадне руйнування. Критичними сигналами є зниження частоти більш ніж на 30 %, зростання амплітуди деформацій понад 50 %, поява локалізованих форм коливань, зменшення демпфування. Запропоновано уточнення до умов енергетичного підходу при оцінюванні поширення прогресуючого обвалення з урахуванням динамічних характеристик та локалізації деформацій у формах коливань (тобто структурної вразливості). Уточнено умови визначення динамічного коефіцієнта з урахуванням спектра частот і демпфування. Сформульовано завдання конструктивного формоутворення на основі динамічного аналізу з метою підвищення опору прогресуючому обваленню. **Висновки.** Використання динамічних коефіцієнтів (ударних множників), рекомендованих нормативними документами, є виправданим, але недостатнім без урахування індивідуальних характеристик конкретної конструкції. Аналіз власних форм коливань конструкцій будівлі можуть відображати потенційно слабкі місця, де деформації та напруження в конструкціях будуть найбільшими. Це важливо при прогнозуванні механізму розвитку прогресуючого обвалення. Результати дослідження можуть бути використані при оцінці вразливості існуючих будівель, а також при проектуванні нових конструкцій, стійких до прогресуючого обвалення згідно з сучасними вимогами безпеки.

Ключові слова: прогресуюче обвалення; частоти та форми коливань; чисельне моделювання; конструктивна схема; каркасна конструктивна схема

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DYNAMIC CHARACTERISTICS ON THE DEVELOPMENT OF PROGRESSIVE COLLAPSE OF BUILDING STRUCTURES

DAVYDOV I.I.^{1*}, *Cand. Sc.(Tech.), Assoc. Prof.*,
CHABAN V.P.², *Cand. Sc.(Tech.), Assoc. Prof.*,
KOVTON-HORBACHOVA T.A.³, *Cand. Sc.(Tech.), Assoc. Prof.*,
KOVTON K.A.⁴, *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: i.i.davydov@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7687-2241

² Department of Metal, Wooden and Plastic Structures Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: v.p.chaban@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0217-5504

³ Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: t.a.kovton_horbachova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

⁴ Department of Construction Technology and Geodesy, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (0563) 73-15-44, e-mail: k.a.kovton@ust.edu.ua, ORCID ID: 0009-0009-5457-0045

Abstract. The paper investigates the influence of dynamic characteristics of building structures on the mechanisms of progressive collapse development. It is shown that natural frequencies, mode shapes, and damping levels significantly affect the propagation pattern of collapse following the initial failure of one or more load-bearing elements. Based on the obtained results, vulnerability assessment criteria are formulated that take into account the dynamic properties of structures. **Purpose of the article.** The purpose of this study is to establish the relationship between the dynamic characteristics of a structural system and the mechanisms of progressive collapse development. Special attention is given to the effect of natural frequencies, vibration modes, and damping level on the likelihood of structural excitation leading to instability or further collapse. Based on a numerical analysis of a steel-framed building, a direct relationship is demonstrated between local damage and the redistribution of stiffness in the structural system. The analysis of changes in dynamic characteristics makes it possible to identify potentially vulnerable zones with reduced resistance to progressive collapse. To assess collapse vulnerability, it is advisable to determine the first 3–5 natural frequencies and corresponding mode shapes, as well as damping properties. A significant reduction in stiffness leads to the localization of vibrations, increased amplitudes, and potential energy accumulation. If the system is unable to dissipate vibrations due to insufficient damping, cascading failure may occur. Critical warning signs include a frequency decrease of more than 30 %, an increase in deformation amplitude by over 50 %, the emergence of localized vibration modes, and a reduction in damping. Clarifications are proposed to the conditions of the energy-based approach for evaluating the propagation of progressive collapse, taking into account dynamic characteristics and the localization of deformations within vibration modes (i. e., structural vulnerability). The criteria for determining the dynamic coefficient are refined to consider the frequency spectrum and damping. Design tasks are formulated based on dynamic analysis to enhance resistance to progressive collapse. **Conclusions.** The use of dynamic coefficients (impact factors) recommended by building codes is justified but insufficient without considering the individual properties of the specific structure. The analysis of structural vibration modes can reveal potential weak spots where deformations and stresses are expected to be the highest. This is crucial for predicting the mechanisms of progressive collapse propagation. The results of this research can be applied in assessing the vulnerability of existing buildings and in designing new structures resistant to progressive collapse in accordance with modern safety requirements.

Keywords: *progressive collapse; natural frequencies and vibration modes; numerical modeling; structural layout; frame structural system*

Постановка проблеми. Найчастіше під час проектування динамічні характеристики враховуються динамічними коефіцієнтами та обмеженнями частот нижчих форм власних коливань. Існують анти-резонансні вимоги, які прямо забороняють або обмежують певні діапазони власних частот конструкцій у мостах та будинках. Наприклад, перша

власна частота коливань прогонової будови повинна бути: у вертикальному напрямку – не менше ніж 3 Гц; у горизонтальному напрямку – не менше ніж 1,3 Гц; для кручення – не менше ніж 0,5 Гц. У національних нормах [7] при аналізі вітрових навантажень вводять граничний критерій для першої форми власних коливань 4 Гц (або

0,25 сек). Рекомендується застосовувати динамічний коефіцієнт (наприклад, ударний множник), який складає 2–3. Важливість врахування динамічних характеристик при оцінці ризику розвитку прогресуючого обвалення підкреслюється в нормативних документах [1–6]. У роботах [8–10] наводяться рекомендації щодо аналізу динамічних ефектів поглинання у вузлах та демпфування. Врахування динамічних характеристик не лише дозволяє підвищити точність прогнозування ризику прогресуючого обвалення, але й дозволяє розробити раціональні заходи підсилення та конструктивні рішення, що знижують вразливість системи до вторинних руйнувань.

Мета й завдання. Метою дослідження є встановлення взаємозв'язку між динамічними характеристиками будівельної конструкції та механізмами розвитку прогресуючого обвалення. Особлива увага приділяється впливу власних частот, форм коливань та рівня демпфування на ймовірність збудження конструкції до стану втрати стійкості або подальшого руйнування.

Виклад матеріалу. Розглянемо, як будуть впливати форми коливань (як умовна характеристика просторової жорсткості конструктивної схеми) та вплив конкретних форми коливань на ймовірність поширення прогресуючого обвалення.

Досліджуванім об'єктом є одноповерхова промислова будівля з каркасною конструктивною схемою, яка має габарити в плані – 48×18 м.

Будівля оснащена електричним мостовим краном вантажопідйомністю 10 т. Відмітка головки рейок становить +20.000, нижній рівень ферм +22.500 (рис. 1).

У підвалі зі залізобетонною конструктивною схемою та на першому поверсі розташовано обладнання для динамічних випробувань.

Несучий сталевий каркас складається з 9-ти поперечних рам із кроком 6 м, які пов'язані між собою, вертикальними зв'язками по колонах, підкрановими

конструкціями та конструкціями покриття. Жорсткість диска покриття забезпечується горизонтальними зв'язками по фермах, вертикальними зв'язками в рівні ферм, а також диском, який запроєктовано з використанням залізобетонних плит покриття.

Колони каркасу між відмотками –1.500 до +19.408 виконані зі зварених двотаврів (нижня полиця – № 45, верхня – 450×20 мм, стінка – 1225×8 мм, ребра – 14 мм, крок 2,4 м). Надкранова частина (до +24.600) – стінка 560×8 мм.

Фахверкові стійки запроєктовано зі швелерів № 30 і мають складений двотавровий перетин.

Підкранові балки виконані розрізними з прокатного двотавра № 45 з накладками (360×10 мм верх, 210×12 мм низ), ребра мають товщину 12 мм.

Кроквяні ферми покриття виконані з прольотом з жорстким примиканням до колон. Висота ферм на опорах складає 1,8 м, на опорі, у середині – 2,55 м. Елементи ферм виконані з спарених рівнополичних кутників: пояси – 160×10 мм; стійки, розкоси – 75×6, 100×10 мм, з'єднання – заклепки Ø20 мм. Кріплення до колон – болти М20.

Зв'язки по фермах покриття – вертикальні зв'язкові ферми, горизонтальні хрестові та розпірки з кутників 75×6 мм.

Плити покриття виконані ребристі за серією 1.465, 3×6 м, ребра 300 мм.

Покрівля виконана тепла м'яка рулонна.

Стінове огороження – навісні панелі з керамзитобетону товщиною 200 мм (серія ЖБ-1196).

Перша форма власних коливань відповідає першому тону поступальних згинальних коливань поперечних рам (розгойдування в поперечному напрямку). Друга форма власних коливань відповідає закручуванню покриття відносно вертикальної осі. Третя форма власних коливань відповідає першому тону поступальних згинальних коливань поздовжніх рам (розгойдування в поздовжньому напрямку).

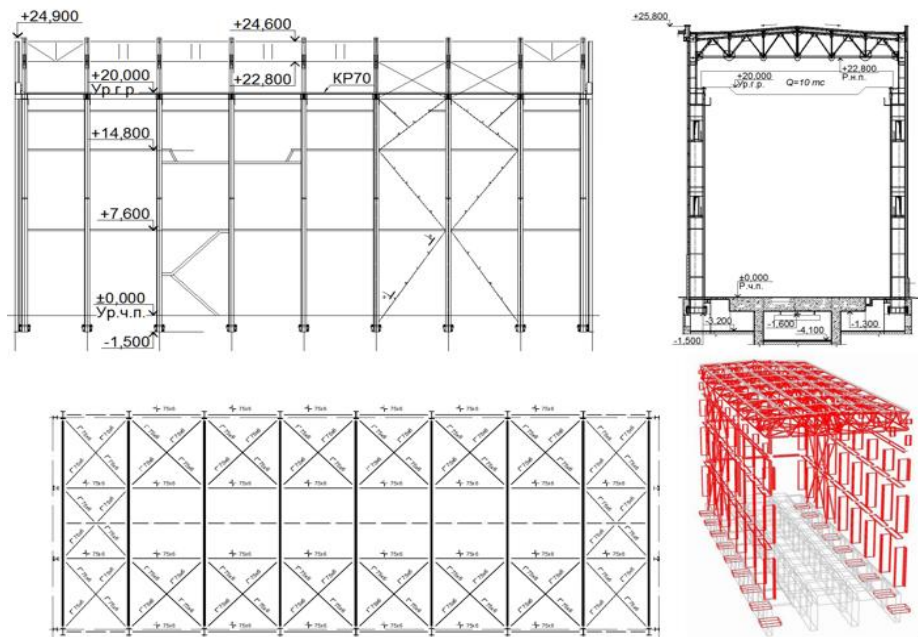


Рис. 1. Конструктивна схема будівлі, розрахункова модель

Ці форми характеризуються найбільшими амплітудами згинальних коливань у верхніх перерізах колон. Четверта форма власних коливань відповідає першому тону згинальних коливань конструкцій покриття з найбільшими амплітудами згинальних коливань ферм покриття. Далі йдуть складні просторові форми коливань з переважанням місцевих згинальних коливань колон і ферм покриття, крутильних коливань будівлі щодо вертикальної осі. Числові значення частот наведено у таблиці 1.

Зниження частоти поперечної форми коливань (першої форми) у разі руйнування (втрати) крайньої колони виникає асиметрія жорсткості, що призводить до зменшення жорсткості каркасу. При цьому зменшена частота першої форми коливань складає 1,1 Гц. Також змінюються форма коливань зі зміщенням максимуму амплітуди коливань – виникають локальні згини поясів ферми поблизу зниклої колони. Ферма переходить з двохопорної схеми до консольної схеми. Зростає згинальний момент у верхньому поясі ферми, напруження наближаються до межі міцності. Можна зробити висновок, що конструктивна система буде нестійка і це може привести до розширення зони обвалення на сусідні елементи.

Втрата (руйнування) вертикальних зв'язків по колонах призводить до зниження просторової жорсткості каркасу, особливо в торсійному напрямку. При цьому характерне зниження частоти другої форми коливань до 1,22 Гц та третьої форми до 1,38 Гц. Також змінюються форма коливань – виникає нерівномірне закручення (перекося рами). Характерне збільшення кутових переміщень покриття, на які не розраховані вузли закріплення стінових панелей, плит покриття та опорних вузлів ферм. Обвалення конструкцій буде призводити до подальшого зменшення жорсткості і система буде нестійка. Це може спричинити прогресуюче обвалення покриття на сусідній ділянці.

Втрата однієї зі стропильних ферм спричиняє локальне порушення жорсткості покриття, що критично впливає на динамічні характеристики всієї конструктивної системи.

В результаті втрати (руйнування) ферми відбувається зниження частот 4-ї форми коливань до 4,68 Гц. Також змінюються форма коливань – різке зростання амплітуд коливань у напрямку, перпендикулярному до втраченої ферми. Зменшення жорсткості конструктивної системи призводить до зростання амплітуд коливань у суміжних фермах, які автоматично включаються у перенапружений режим бо працюють на згин

та кручення. Вичерпання несучої здатності суміжних ферм буде ініціювати каскадний обрив ферм покриття далі.

Власні частоти коливань будівлі залежать від жорсткості, маси та умов закріплення. Форми коливань та їх послідовність у спектрі частот визначаються співвідношеннями різних видів жорсткостей (табл. 1). Наприклад, жорсткість колон при згинанні в напрямку поперечної рами, поздовжньої рами, жорсткість при згинанні конструкцій перекриття та інше. Істотні пошкодження несучого елемента

(наприклад, колони, ригеля чи вузла з'єднання) можуть привести до зміни (зменшення) певного типу жорсткості будівлі. Відповідно відбудеться перебудова послідовності форм коливань відповідно до значень частот власних коливань (табл. 2). Частоти коливань також змінюються пропорційно до зменшення жорсткості, що зумовлено ушкодженнями. Таким чином, коли конструктивна система втрачає жорсткість, відбувається зміна динамічних характеристик.

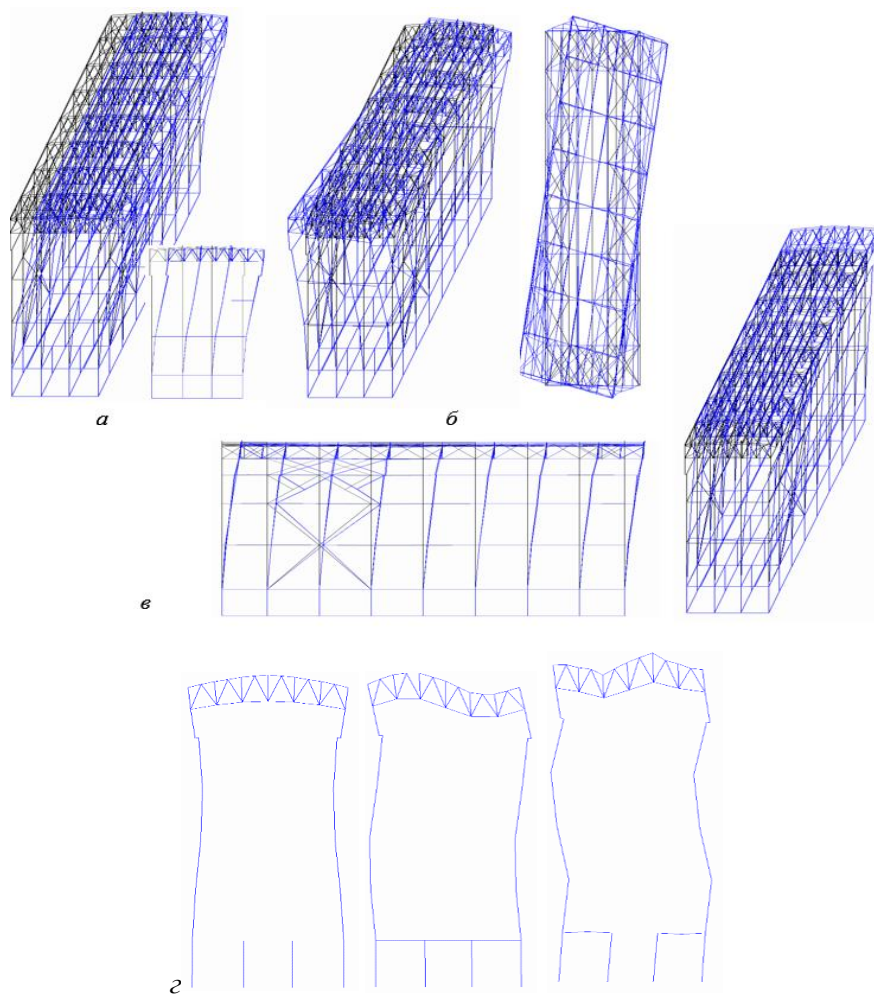


Рис. 2. Форми коливань: а – перша, б – друга, в – третя, г – четверта

Таблиця 1

Частоти та форми власних коливань будівлі

Форма коливань	Опис форм	Частота, Гц	Період, с
1 (рис.2,а)	Поперечне розгойдування рам	1,279	0,782
2 (рис.2,б)	Закручування даху (торсіонне)	1,682	0,595
3 (рис.2,в)	Повздовжнє розгойдування рам	2,078	0,481
4 (рис.2,г)	Вигини ферм покриття	6,412	0,156

Таблиця 2

Вплив динамічних характеристик на ризик розвитку прогресуючого обвалення

Зруйнований елемент	Основні зміни частот	Зміна форми коливань	Втрата жорсткості	Потенційний механізм обвалення	Ступінь загрози
Крайня колона	Перша форма до 1,10 Гц	Асиметрія, локальні згини поблизу колони	У поперечному напрямку	Перехід ферми до консольної схеми, перевантаження ферм	Високий ризик прогресуючого обвалення
Вертикальні зв'язки по колонах	Друга форма до 1,22 Гц, третя – до 1,38 Гц	Скручування рам, зсув максимуму амплітуд	Просторова жорсткість, особливо на кручення	Відмова стиків панелей, плит покриття, послідовне обвалення	Високий ризик прогресуючого обвалення
Стропильна ферма	Четверта форма до 4.68 Гц	Пік амплітуд в зоні втрати ферми, зростання коливань сусідніх ферм	Локальна жорсткість покриття	Каскадний обрив ферм у вигляді ланцюгової реакції	Високий ризик прогресуючого обвалення

Можна визначити залежність між локальним пошкодженням та перерозподілом жорсткостей будівлі. Аналізуючи ці зміни можна спрогнозувати зони, які можуть бути залучені до впливу на зниження опору до прогресуючого руйнування.

Якщо визначити динамічних характеристики (експериментально чи чисельно) можна виконати оцінку схильності конструктивної схеми до прогресуючого обвалення. Таким чином потрібно визначити перші 3–5 власних частот коливань, відповідні форми коливань та показники демпфування.

Суттєва зміна динамічної поведінки може свідчити про критичну втрату жорсткості та нестійкість будівлі до опору прогресуючому обваленню. Якщо жорсткість конструктивної системи (відповідно власні частоти коливань) суттєво знижуються це призведе до локальних зміщень у формах коливань та буде вказувати на потенційну «зону» руйнування.

Додатковий показник це аналіз характеристик демпфування. Власні коливання у конструктивній схемі будівлі без пошкоджень згасають за рахунок внутрішніх втрат енергії, тертя, властивостей матеріалів. Це ознака стійкої поведінки конструкції до опору прогресуючому обваленню.

Якщо виникає зниження жорсткості, коливання будуть згасати довше або можуть

наростати (резонансно або через накопичення енергії) при недостатньому демпфуванні. Наприклад, після втрати колони конструктивна система може перейти у динамічну нестійкість і можливі виникнення локальних коливань з високою амплітудою. Ці коливання будуть зосереджуватись у певних зонах конструктивної схеми та їм відповідатимуть місцеві форми коливань.

Якщо конструктивна система не може погасити ці коливання тоді будуть виникати додаткові динамічні навантаження на ділянці конструктивної системи. При досягненні критичних деформацій або втраті рівноваги інших елементів можливе каскадне руйнування.

Таким чином, критична зона щодо ризику прогресуючого обвалення конструктивної схеми може бути визначена як така, в якій: відносне зниження частоти перевищує поріг (наприклад, 25–30 %), амплітуда деформацій у формі коливань після пошкодження збільшується більш ніж на 50 %, з'являється локалізація деформацій – максимальні переміщення зосереджуються в одній зоні конструкції, одночасно спостерігається зниження локального демпфування чи затягнуте згасання колінь.

Згідно [10] розширена умова енергетичного підходу при оцінці поширення прогресуючого обвалення з урахуванням динамічних характеристик:

$$\gamma_d \cdot \sum m_i \times g \times h_i \geq \sum (0.5 \times F_{кр} \times \delta), \quad (1)$$

де γ_d – динамічний коефіцієнт, що враховує імпульсне навантаження, ударний ефект при падінні елементів, їх швидкість, демпфування, тертя між елементами, в'язкі втрати в матеріалі (1,5–3).

$m_i \times g \times h_i$ – потенційна енергія падіння всіх мас, що можуть залучатися до процесу обвалення (від висоти h_i до рівня обвалення);

$\sum(0.5 \times F_{кр} \times \delta)$ – енергія, яку конструкція або її елементи (включаючи зв'язки, перекриття, з'єднання) здатні поглинути без втрати стійкості;

$F_{кр}$ – граничне (максимальне) зусилля, яке здатен витримати елемент конструкції перед руйнуванням (може бути сила розтягу, зсуву, згину залежно від ситуації);

δ – відповідна деформація (переміщення) при цьому граничному зусиллі;

0.5 – коефіцієнт, який враховує, що в більшості випадків сила зростає від 0 до $F_{кр}$.

Динамічний коефіцієнт γ_d можна уточнити з урахуванням спектра частот та демпфування так, що у конструктивній системі з малим демпфуванням та низькими частотами коливань підсилюється імпульсний ефект:

$$\gamma_{d1} = \gamma_d \times (1 + \alpha_1 / \zeta + \alpha_2 / f_{\min}), \quad (2)$$

де γ_d – базовий динамічний коефіцієнт, що враховує імпульсне навантаження, ударний ефект; α_1 , α_2 – коефіцієнти, визначаються чисельно або експериментально для конструктивної системи; ζ – демпфування (0,02...0,05 для сталевих конструкцій); $f_{\min}$ – мінімальна власна частота після пошкодження.

Праву частину (1) можна зменшити множителем, який враховує локалізацію деформацій у формі коливань, тобто структурну вразливість:

$$\sum(0,5 \times F_{кр} \times \delta) \times (1 - \lambda), \quad (3)$$

де λ – індикатор локалізації у формі коливань, відносна зміна деформаційної форми після пошкодження, чим більша λ , тим менше здатна конструкція до поглинання енергії (все концентрується в одному місці).

У прикладі, що розглядається (див. табл. 1, 2), для другої форми $f_{\min} = 1,68$ Гц, $\zeta = 0,03$, $\gamma_d = 1,5$ до пошкодження. Після втрати ферми: $f_{\min} = 1,22$ Гц, $\zeta = 0,03$, $\alpha_1 = 1$ для

надчутливих систем або в гіпотетичній межі нестійкості [8], $\alpha_2 = 0,5$ передбачає помірну чутливість до мінімальної частоти [8], $\gamma_{d1} = 1,5 \times (1 + 1/0,03 + 0,5 / 1,22) = 52$. Показує можливість реалізації гігантського динамічного ефекту.

Можна сформулювати завдання конструктивного формоутворення на основі динамічного аналізу для підвищення опору прогресуючому обваленню.

При проектуванні слід орієнтуватися на розподілені форми власних коливнь, без концентрації деформацій в окремих зонах, $\lambda < 0,3$. Це досягається шляхом рівномірного розподілу жорсткості по всій системі.

Створювати резерви жорсткості у критичних напрямках – посилювати конструкцію саме у цих напрямках (наприклад, торсійні рамні зв'язки, просторові фахверки). Зниження частот не більше ніж на 20 %.

Якщо втрата однієї ферми викликає каскадне зниження частот, конструкцію слід формувати з незалежних жорсткісних блоків, щоб деформації не передавалися неконтрольовано на суміжні ферми.

Забезпечувати перші 3–5 власних частот $f_{\min} > 3$ –4 Гц.

Контролювати форми коливань під час проектування, на етапі моделювання проводити аналіз зон з потенційно великою амплітудою, небажану асиметрію або перекося, локалізовані деформації після «умовного» видалення елемента.

Висновки

Використання динамічних коефіцієнтів (ударних множників), рекомендованих нормативними документами, є виправданим, але недостатнім без урахування динамічних характеристик конкретної конструкції.

Аналіз власних форм коливань конструкцій будівлі можуть відображати потенційно слабкі місця, де деформації та напруження в конструкціях будуть найбільшими. Це важливо при прогнозуванні механізму розвитку прогресуючого обвалення.

Результати дослідження можуть бути використані при оцінці вразливості існуючих будівель, а також при проектуванні нових

конструкцій, які будуть стійкими до прогресуючого обвалення згідно з сучасними вимогами безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. UFC 4-023-03 (Including Change 4, 10 June 2024). Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. (Department of defense USA).
2. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance (2016) URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>, Revision 1, January 28, 2016.
3. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance (2016) URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>, Revision 1, January 28, 2016.
4. American Society of Civil Engineers ASCE 76-23 : Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures ASCE Library (2023), 10.1061/9780784415931. URL: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415931>
5. UFC 4-023-07. Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA. 2008. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>
6. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA. 2002. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>
7. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи (із Зміною №1 від 01.10.2007р. та Зміною № 2 від 01.06.2020). Київ : Мінбуд України, 2006. 60 с.
8. Барштейн М. Ф., Бородачев Н. М., Блюмина М. Я. и др. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Под. ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. 1981. 215 с.
9. Давыдов И. И., Особенности расчета и защиты строительных конструкций от прогрессирующего обрушения. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 11. С. 38–46.
10. Starossek U. Progressive collapse of structures (Second edition), ICE Publishing, Westminster, London, 2017. DOI: 10.1680/pcos.61682; URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/pcos.61682>

REFERENCES

1. UFC 4-023-03 (Including Change 4, 10 June 2024). Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. (Department of defense USA).
2. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance (2016) URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>, Revision 1, January 28, 2016.
3. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance (2016) URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>, Revision 1, January 28, 2016.
4. American Society of Civil Engineers ASCE 76-23 : Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures ASCE Library (2023), 10.1061/9780784415931. URL: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415931>
5. UFC 4-023-07. Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA. 2008. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>
6. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA. 2002. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>
7. DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya i vplyvy (iz Zminoyu № 1 vid 01.10.2007 ta Zminoyu № 2 vid 01.06.2020) [DBN V.1.2-2:2006. Loads and Effects (with Amendment No. 1 from 01.10.2007 and Amendment No. 2 from 01.06.2020)]. Kyiv : Ministry of Civil Engineering of Ukraine, 2006, 60 p. (in Ukrainian).
8. Barshtein M.F., Borodachev N.M., Blyumina M.Ya. et al. *Dinamicheskiy raschet sooruzheniy na spetsial'nyye vozdeystviya*. Pod. red. B.G. Koreneva, I.M. Rabinovicha [Dynamic Analysis of Structures under Special Loads; edited by B.G. Korenev and I.M. Rabinovich]. 1981, 215 p. (in Russian).
9. Davydov I.I. *Osobennosti rascheta y zashchyty stroytel'nykh konstruksiy ot prohressyruyushcheho obrusheniya* [Features of the Calculation and Protection of Building Structures from Progressive Collapse]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2010, no. 11, pp. 38–46. (in Russian).
10. Starossek U. Progressive collapse of structures (Second edition), ICE Publishing, Westminster, London, 2017, doi: 10.1680/pcos.61682. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/pcos.61682>

Надійшла до редакції: 21.12.2025.