

УДК 624.04.001.57(045)

DOI <https://doi.org/10.36059/978-966-397-312-8-12>

ПИТАННЯ ОПОРУ ПРОГРЕСУЮЧОМУ РУЙНУВАННЮ НЕСУЧИХ СИСТЕМ У ПК ЛІРА-САПР

М. С. Барабаш

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерних технологій
будівництва та реконструкції аеропортів
Національного авіаційного університету
ORCID: 0000-0003-2157-521X
bmari@ukr.net

Стаття присвячена опису розрахунково-конструктивних методів, що застосовуються при проектуванні для уникнення прогресуючого обвалення будівель та споруд у разі екстремальних впливів. Описано три напрямки, які дозволяють уникнути процесу розвитку локальної руйнації до глобальної. Також обґрунтовано концепцію, реалізовану в програмному комплексі ЛІРА-САПР, спрямовану на автоматизацію розрахунку на прогресуюче обвалення у квазістатичній та динамічній постановках, що включають лінійний та нелінійний розрахунок з урахуванням коефіцієнта динамічності. Мета розрахунку є проектування споруд різного призначення, які крім безаварійного виконання функцій протягом заданого терміну експлуатації, у разі аварії через природні та техногенні явища (дефектів у технології виробництва, вибухів, ударів), а також інших причин, не передбачених умовами нормальної експлуатації, завдавали б мінімальних збитків людям та навколишньому середовищу. Для забезпечення нерозповсюдження локального пошкодження та перетворення його на глобальне можливо виділити три напрямки: зниження рівня «ризик», збільшення ступеня статичної невизначеності системи, розрахунково-конструктивні «відповіді» на можливі ушкодження.

Ключові слова: прогресуюче руйнування, несучі конструкції, нелінійний розрахунок, стійкість, квазістатичний розрахунок, ризики, вибухові впливи, коефіцієнт динамічності.

Mariia Barabash. THE ISSUE OF RESISTANCE TO THE PROGRESSIVE DESTRUCTION OF BEARING SYSTEMS IN LIRA-SAPR SOFTWARE

The article is devoted to the description of analytical and structural methods used in the design to avoid progressive collapse of buildings and structures in the case of extreme influences. Three directions are described to avoid the process of development of local to global destruction. The concept realized in the LIRA-SAPR software, which is aimed at automating analysis for progressive collapse in quasi-static and dynamic formulations, including linear and nonlinear analysis taking into account the dynamic factor, is also substantiated. The purpose of the analysis is to design structures for various purposes, which in addition to accident-free performance of functions during the specified period of operation, in case of an accident due to natural and man-made phenomena (defects in production technology, explosions, impacts), as well as other causes not provided for by the conditions of normal operation, would cause minimal damage to people and the environment. In order to ensure the non-spreading of local damage and its transformation into a global one, it is possible to distinguish three directions: reducing the level of "risk", increasing the degree of static uncertainty of the system, calculation and constructive "answers" to possible damage.

Keywords: *progressive failure, load-bearing structures, nonlinear analysis, stability, quasi-static analysis, risks, explosive effects, dynamic factor.*

Вступ. Поняття прогресуючого руйнування (обвалення) в умовах воєнних дій набуває нової актуальності. Незалежно від джерела виникнення та характеру навантаження прогресуюче руйнування кваліфікується як процес розвитку деформацій від локальних — до глобальних. У поточних реаліях стає необхідним враховувати у розрахунках та проектуванні всілякі можливості запобігання прогресуючому руйнуванню, особливо при проектуванні багатоповерхових каркасів будівель. Що стосується споруд іншого типу, так званих великопрогонових споруд: мостів, систем покриттів, що працюють за плоскою та просторовою схемою, то тут становище більш невизначене, і потрібні дослідження, спрямовані на вивчення шляхів перетворення локального руйнування на глобальне.

Забезпечення протидії прогресуючому руйнуванню необхідне для всіх будівель і споруд. Це означає, що в цих будівлях мають бути передбачені конструктивні заходи, що гарантують опір прогресуючому руйнуванню.

Джерела прогресуючого руйнування слід, також шукати не тільки в складних конструктивних системах, а в самій структурі твердого тіла. Механіка руйнування у пошуках виявлення вогнищ тріщиноутворення та подальшого розвитку тріщин вирішує ту саму задачу: чи залишиться тріщина локальною або розвиваючись, призведе до повного руйнування тіла? Для конструктивно анізотропних систем безперервний процес розвитку тріщин стає таким, що ступінчасто розвивається. Тоді виявляється можливим зафіксувати та запобігти подальшим «переходам» від локального до глобального руйнування конструкції.

Постановка задачі. Для вирішення цієї задачі необхідний аналіз кожної несучої системи і виявлення «слабких місць» і шляхів запобігання прогресуючого руйнування. Діючі будівельні норми (Євронорми, ДБН) [1; 8; 9] вимагають, щоб будівельні конструкції та основи були запроектовані таким чином, щоб вони мали достатню надійність при зведенні та експлуатації з урахуванням, при необхідності, особливих впливів (наприклад, внаслідок землетрусу, повені, пожежі, вибуху).

Серйозним поштовхом до вирішення проблеми стала терористична діяльність. Хоча й до неї катастрофічних руйнувань будівель і споруд цілком достатньо. Сьогодні у світі діє низка нормативів, що регулюють вирішення проблеми. Їхня відмінність від інших — у постійному розвитку, оскільки результати спостережень, досліджень та рекомендацій для нового будівництва накопичуються швидко та дуже затребувані. Серед цих нормативів національні норми США, Канади, Великобританії, міжнародні норми: Єврокод та ін.

Для забезпечення нерозповсюдження локального пошкодження та перетворення його на глобальне можливо виділити *три напрямки*:

- зниження рівня «ризиків»;
- збільшення ступеня статичної невизначеності системи;

- розрахунково-конструктивні «відповіді» на можливі ушкодження.

1. Зниження рівня ризику

Є, як мінімум, два шляхи вирішення питання шляхом зниження рівня «ризиків» [2; 6]. Посилання на норми ДБН за надійністю як і багато інших документів колишніх років, вирішує це питання шляхом запровадження коефіцієнта надійності за відповідальністю. Вперше коефіцієнт надійності за призначенням залежно від класу капітальності споруди з'явився у нормах проектування гідротехнічних споруд: $\gamma_n = 1,25$ для споруджень 1-го класу капітальності. Очевидно, що таке директивне призначення коефіцієнта γ_n веде до суттєвих додаткових витрат, але одночасно суттєво підвищує безпеку при руйнуваннях від відомих за величиною, напрямом та характером впливів. При цьому нерозв'язною проблемою є ушкодження внаслідок невідомих за напрямом впливів та впливів після зміни розрахункової схеми.

Можливий прямий розрахунок «ризиків» та його заплановане зниження, яке обумовлюється контрактними документами.

Методику розрахунку проілюструємо прикладом обчислення ризику руйнування стержня від стиску, що виникає під час теракту (рис. 1, див. с. 305).

- Позначимо через S зовнішню силу, при якій має відбутися руйнування стержня, і через силу R , що визначається шляхом руйнування зразків.

- Руйнування стержня станеться, якщо $R < S$ или $R - S < 0$. Ризик дорівнює: $m = R - S$.

- Математичне очікування ризику

$$\hat{m} = \hat{R} - \hat{S}; \sigma_u = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \sigma_S \sqrt{1 + \sigma_R^2 / \sigma_S^2} = \sigma_S \alpha \dots$$

$$\alpha = \sqrt{1 + \sigma_R^2 / \sigma_S^2}.$$

Імовірність $P(x)$ при зміні змінної x на $u = (x - \xi) / \sigma$:

$$\Phi(u) = (1 / \sqrt{2\pi\sigma}) \int_{-\infty}^u e^{-u^2/2} du$$

і ризик дорівнює

$$risk = P\{(R - S) > 0\} = 1 - P(m > 0) = \Phi\left(\frac{0 - m}{\sigma_m}\right) = \Phi\left(-\frac{m}{\sigma_m}\right).$$

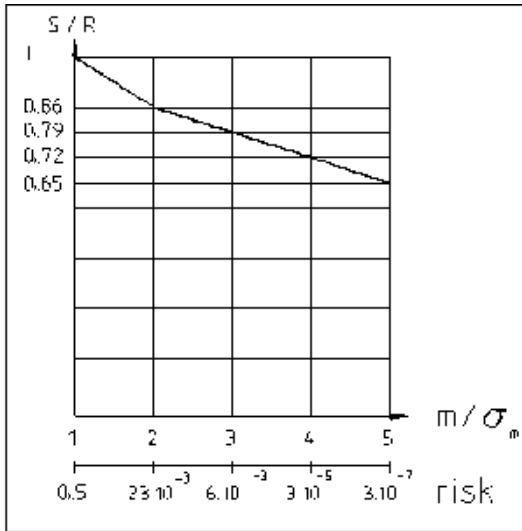


Рисунок 1 — Зниження ризику шляхом посилення стисненого стержня

З графіка на рис. 1 слід, що зменшення відношення навантаження до опору з 1 до 0,65 призводить до зниження ризику з 0,5 до $3,10^{-7}$.

Слід пам'ятати, що зниження ступеня ризику успішно вирішує лише необхідну частину задачі — зростає надійність каркаса у вигляді, який призначений опору експлуатаційним впливам. Однак, зміни, що відбулися в каркасі: утворення нових шарнірів, зникнення деяких несучих елементів і т. ін., ніяк не позначається на рівні ризику зі збільшенням коефіцієнта надійності за призначенням. Тому підкреслимо, що рішення виявляється необхідним, але недостатнім.

Зниження ризику може бути досягнуто і більш ефективним способом. Для цього необхідно попередньо ранжувати саму

споруду та складові її елементи, задаючи в кожному випадку ризик за ступенем наслідків від кожного виду руйнування.

Задача полягає в тому, щоб **при мінімальному зростанні** витрат або без їх збільшення **знижити ризик** руйнування споруди. Це рішення лежить в галузі діяльності конструкторів, проектувальників, будівельників та експлуатаційників.

Наслідки порушення зв'язків між конструктивними елементами зовні мало відрізняються від наслідків, які виникають при руйнуванні елементів. Проте, насправді, різниця вельми суттєва. Так, руйнування однієї панелі перекриття, якщо воно не призводить до ефекту «доміно», небезпечне тільки для мешканців 1–2-х кімнат. Руйнування ригеля загрожує нещастям мешканцям 1-єї чи кількох квартир. Руйнування колони верхнього поверху небезпечне для населення цього і, можливо, наступного за ним поверху, а руйнування такої ж колони на 1-му поверсі або в підвалі спричинить суттєво тяжчі наслідки.

Сучасне проектування засноване на **принципі рівнонадійності** всіх конструктивних елементів будівлі. Очевидно, що такий підхід у задачах життєзабезпечення є неприйнятним. Зрозуміло також, що детерміністичний підхід до подібних задач також неприйнятний. Можливий лише ймовірнісний підхід, у якому ймовірність руйнування кожного елемента диференційована та призначена залежно від очікуваних наслідків.

Для кількісної оцінки надійності конструктивних елементів та споруди в цілому доцільно ранжування форм руйнування та наслідків руйнування [3].

За **нижню межу** слід прийняти плоский зсув, за **верхню межу** — перекидання. Дефекти, що відповідають 2-ій групі граничних станів, до табл. 1 не включені.

Таке ранжування, наприклад, може бути задане у вигляді, представленому в табл. 1 (див. с. 307).

Цей спосіб сьогодні існує тільки у вигляді пропозиції. Він суперечить прийнятому в нормах принципу рівнонадійності. Але саме цей спосіб дозволяє більш раціонально проектувати несучі конструкції. Для унікальних споруд він може виявитися технічно

та економічно виправданим. Диференційований підхід до регламентації допустимого рівня ризику дозволяє вирішувати задачу опору прогресуючому руйнуванню більш економічно.

Таблиця 1 — Ранжування дефектів

Конструкція та вид руйнування	Бал
Втрата стійкості (зсув)	*
Руйнування панелі перекриття нижнього поверху	**
Руйнування панелі перекриття верхнього поверху	***
Руйнування балки перекриття нижнього поверху	****
Руйнування балки перекриття верхнього поверху	*** **
Руйнування ригеля верхнього поверху	*** **
Руйнування колони нижнього поверху	*** *** **
Руйнування колони верхнього поверху	*** *** *
Руйнування стінової панелі нижнього поверху	***
Руйнування стінової панелі верхнього поверху	*** **
Втрата стійкості на перекидання	*** ** * ** * ** * ** *

Що може статися зі спорудою при екстремальному впливі?

1. Будівля може втратити стійкість проти зсуву.

При цьому порушиться цілісність комунікацій: виникне загроза затоплення підвалів через труб водопроводу, тепломережі і каналізації, що розірвалися; відбудеться знеструмлення або замикання у мережах електропостачання, зупиняться ліфти; виникне загроза пожежі — може виникнути паніка серед мешканців.

2. Будівля може втратити стійкість проти перекидання.

Навіть якщо в процесі перекидання не станеться взаємне зміщення конструктивних елементів або їх руйнування, ймовірність відсутності людських жертв мала. В принципі, перекидання у чистому вигляді можливе лише у будинках із монолітного залізобетону. У збірних будинках панельного, каркасного типу, у тому числі з металевим каркасом, перекидання, як правило, призводить до повного порушення в'язів між конструктивними елементами.

3. У будівлі може статися руйнація в'язів між конструктивними елементами: сходження панелей перекриттів з опор

на стінах і балках, розрив стиків колон, відрив стінових панелей від каркасу та розрив в'язів між самими панелями.

4. Руйнування конструктивних елементів: панелей перекриттів, ригелів каркасу, балок, стійок каркасу, колон, стін.

5. Надмірне розкриття тріщин у конструктивних елементах та огороджувальних конструкціях.

6. Наднормативні прогини конструктивних елементів або взаємні кути повороту між ними.

Спробуємо проаналізувати тяжкість наслідків для кожної з форм порушення проектного положення, міцнісних та деформативних властивостей споруди та її конструктивних елементів. Очевидно, що надмірне розкриття тріщин або наднормативні прогини не становлять небезпеки для життя мешканців житлового будинку. Безпосередньої загрози життю та здоров'ю мешканців також не існує. Можливі несприятливі наслідки через виникнення вторинних причин.

Як зазначено вище, перекидання може мати найважчі наслідки. Додамо, що в цьому випадку на небезпеку наражаються не тільки мешканці самого будинку, але і всі, хто знаходиться в межах кола, радіус якого дорівнює висоті будівлі.

2. Збільшення «зайвих» невідомих у каркасі

Звичайно, цей шлях — надмірна статична невизначеність та часто поставлені колони — не є подарунком для архітекторів. Але в деяких випадках це вирішення проблеми безпеки. Цей шлях може виявитися досить ефективним при проектуванні великопрогонових ґратчастих систем із ґратчастими конструкціями. Створюючи багаторешітчасті ферми та арки, застосовуючи комбіновані системи типу ферм Лангера, арок Консидера, висячі та вантові системи з балками жорсткості, конструктор може і повинен створити шляхи резервування несучої здатності так, щоб руйнування не виявлялося раптовим та катастрофічним.

3. Розрахунково-конструктивні «відповіді» на можливі пошкодження

Третій напрямок передбачає проектування систем, здатних чинити опір експлуатаційним впливам та аварійним впливам при змінах розрахункової та конструктивної схеми після локального пошкодження.

Перевага того чи іншого напрямку в першу чергу оцінюється економічними показниками: це співвідношення витрат на посилення конструкцій та втрат, спричинених аварією.

Вважається, що третій напрямок найбільш економічно виправданий і цілеспрямований.

Необхідність і достатність конструктивних заходів, що перешкоджають прогресуючій руйнації, повинна бути підтверджена відповідними розрахунками, і, при необхідності, конструкції мають бути посилені відповідно до результатів розрахунків.

При виконанні таких розрахунків необхідно керуватися вимогами норм та умовами забезпечення безпеки. Методи розрахунку засновані на здатності системи сприймати навантаження навіть при втраті однієї з ключових в'язів.

Очевидно, що ігнорування вимог щодо забезпечення опору прогресуючій руйнації може призвести до повного руйнування несучих конструкцій та будівлі в цілому (рис. 2, а, див. с. 310).

Підвищення міцності та жорсткості конструкцій, засноване на вимоги збереження несучої здатності та придатності до нормальної експлуатації (рис. 2, б, див. с. 310). Цей варіант після будь-якого аварійного впливу потребує максимальних капітальних вкладень.

Більш економічним є компромісний підхід, коли після аварійного впливу зберігається здатність, що несе, а придатність до нормальної експлуатації не забезпечується (рис. 2, в, див. с. 310).

Пропонований у статті та реалізований у ПК ЛІРА-САПР, підхід дозволяє змоделювати різними способами аварійну чи форс-мажорну ситуацію (рис. 2, г) таким чином, щоб забезпечити можливість аварійної евакуації людей за час, поки локальне обвалення переросте в прогресуюче [4]. Конструкції проектуються

таким чином, щоб в аварійній ситуації гарантувалося збереження життя мешканців будівлі. При розрахунку в ПК ЛІРА-САПР враховується ефект перерозподілу зусиль та пристосовуваності конструкцій та їх робота у запроектній стадії.

У програмному комплексі ЛІРА-САПР реалізовано декілька варіантів розрахунку [4]:

- **квазістатична постановка:** лінійний розрахунок, нелінійний розрахунок [7; 10];
- **динамічна постановка:** лінійний розрахунок, нелінійний розрахунок.

У квазістатичній постановці є два розповсюджені підходи: pushdown і pulldown. Наприклад, в нормах США щодо прогресуючого обвалення (UFC 4-023-03-2016, GSA2003-2016) для квазістатичних розрахунків прийнято використовувати частковий pushdown-аналіз, що передбачає збільшення навантажень

Повне руйнування

Варіант II



a

Варіант I



б



в

Варіант III



г

Рисунок 2 — Варіанти наслідків аварійного впливу

на горизонтальні конструкції, що примикають до ланцюжка колон над колоною, що видаляється; а для нелінійних динамічних розрахунків — використовувати частковий силовий pull-down-аналіз, при якому на коефіцієнт динамічності множаться зусилля, що діяли в видалюваному елементі, прикладені зі зворотним знаком.

У вітчизняній практиці прийнято використати частковий силовий pull-down-аналіз. Але в той же час у роботах відомих вітчизняних учених, застосовується pushdown.

Чому це важливо? Такі два підходи не еквівалентні за своїми результатами та коефіцієнти динамічності, що використовуються у двох підходах не рівні. Однак, у ЛІРА-САПР автоматизована схема pull-down-аналізу (рис. 3).

Динаміка процесу. Очевидно, що наведені види навантажень можуть мати динамічну складову. Це відноситься до ударних, сейсмічних, вибухових впливам. Це відноситься і до раптового видалення опор. Розроблено безліч розрахункових моделей, що враховують динамічний характер впливу навантаження на конструкцію. Особливість задачі опору прогресуючому руйнуванню при контактному вибуху полягає у тому, що в початковий момент система має

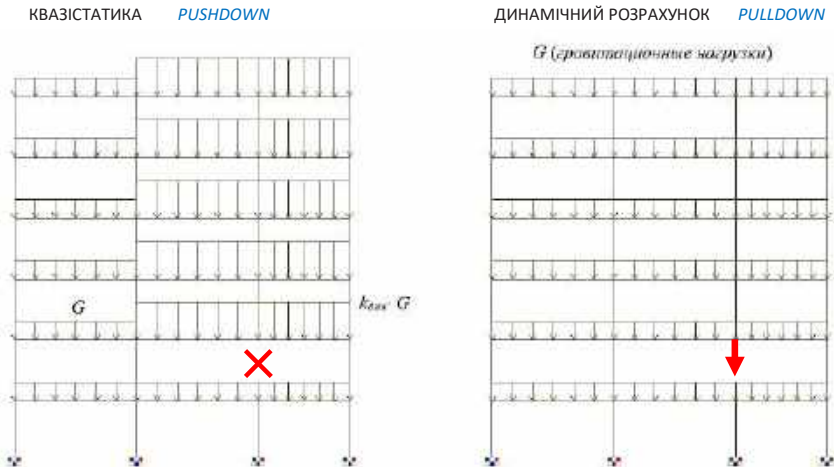


Рисунок 3 — Підходи до вирішення проблеми

цілком пружні властивості, а в процесі деформування стає пружнопластичною і навіть пластичною. Задача не має універсального рішення. Тут обмежимося інформацією про те, що при падінні вантажу на пружне тіло коефіцієнт динамічності дорівнює 2. При падінні вантажу на пластично деформоване тіло він дорівнює 1, при переході тіла в процесі деформування з пружного у пластичний стан коефіцієнт динамічності набуває проміжного значення [5].

В ПК ЛІРА-САПР існує можливість задати коефіцієнт динамічності (K_d) для моделювання локальної відмови елементів конструкції. Він призначається у вузли окремо за всіма ступенями свободи. Тому можна, наприклад, осі Z задати його рівним 2, а за іншими ступенями залишити 1 або інше значення. Таким чином, рішення про величину коефіцієнтів динамічності за будь-яким напрямком приймає розраховувач.

За умовчанням у всіх вузлах записано коефіцієнт 1. Для візуалізації призначених значень K_d є мозаїка.

Особливість даної реалізації в тому, що заданий коефіцієнт спрацьовує тільки в тих вузлах, які належали елементам, демонтованим на останній стадії (в інших стадіях можна демонтувати елементи як раніше, наприклад, тимчасові опори та ін.). Виняток становлять вузли, які в результаті демонтажу стали «висячими», тобто ні до чого не прикріплені. Таким чином можна призначити у всі вузли схеми прийнятий для розрахунку коефіцієнт динамічності, а він спрацює тільки в потрібному місці (рис. 4, див. с. 313).

Такий гнучкий інструмент, в якому все вирішує користувач, ми зробили в першу чергу тому, що поки немає чітких методичних вказівок, яким чином необхідно проводити розрахунок. Змінюються норми. Не вистачає однозначності у цьому питанні. Наприклад, чи необхідно призначити коефіцієнт динамічності 2 на вузол під видаленою колоною? Нескладно переконатися, що в загальному випадку k_d для вузла під видаленою колоною не дорівнює k_d для верхнього вузла.

Зверніть увагу — реакції від віддалених елементів виникли тільки в тих вузлах (рис. 5, див. с. 313), до яких примикали демонтовані елементи, незалежно від того, в які вузли були призначені $K_{дин}$.

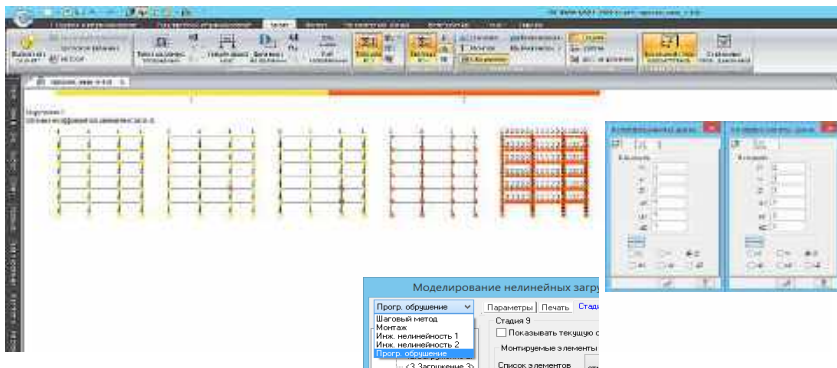


Рисунок 4 — Квазистатична постановка у ПК ЛІРА-САПР

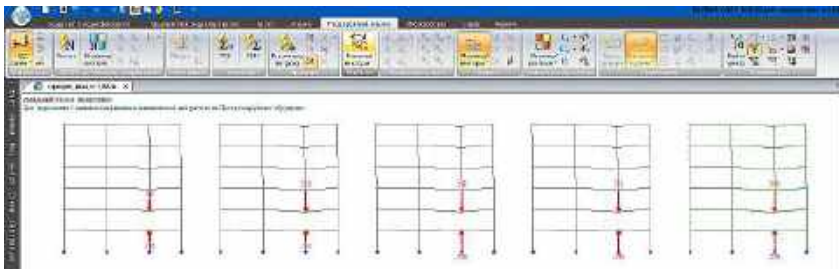


Рисунок 5 — Результат моделювання локальної відмови в квазистатиці (реакції у вузлах)

Важливий фактор реакції конструкції на миттєве прикладання навантаження — це пластичність конструкції в граничній стадії роботи, тобто наявність того самого майданчика пластичної роботи перерізу елемента або вузла з'єднання елементів конструкції.

Викладене дозволяє уявити, що задача не має одноманітного рішення. Вона може ґрунтуватися на величезному різноманітті досягнень будівельної механіки та теорії конструкцій та багато в чому є конструкторською: поєднанням інтуїтивних міркувань та чітких теоретичних доказів. Тому дуже важливим є питання врахування нелінійної роботи конструкцій.

Висновки. Застосування різних видів нелінійності дозволяє врахувати деякі фактори роботи конструкцій і отримати коректні зусилля в її елементах (особливо з урахуванням подібного екстремального впливу, коли в порівнянні з експлуатаційним режимом роботи істотно змінюється характер роботи конструкцій). Звідси вимога норм: «Розрахунок провадиться з урахуванням значних ефектів фізичної, геометричної та конструктивної нелінійностей при руйнуванні / обваленні окремих частин конструкцій».

1. Врахування геометричної нелінійності дозволяє одержати в процесі крокового розрахунку ексцентриситет до вертикальних навантажень. За наявності суттєвого крену споруди, це може призвести до значної зміни напружено-деформованого стану конструкції (що у свою чергу ще збільшить нахил споруди).

2. Врахування геометричної нелінійності дозволяє змінити характер роботи деяких конструкцій у спробі пристосуватися до умов роботи, що змінилися: «При великих прогинах перекриттів слід розглядати їх роботу як роботу елементів висячої системи. При цьому має бути забезпечена конструктивна можливість сприйняття горизонтальних зусиль, що виникають».

3. Врахування фізичної нелінійності дозволяє отримати перерозподіл навантажень між елементами конструкції з урахуванням фактичного НДС їх перерізів відповідно до заданих діаграм роботи.

4. Врахування конструктивної нелінійності (односторонні опори, платформні і контактні стики тощо).

Але це все, звичайно, обов'язково для ситуацій, коли подібні фактори роботи конкретної конструкції мають місце, тобто «з урахуванням значущих ефектів», якщо вони присутні в конкретному розрахунку.

Сучасний стан проектування, зведення та експлуатації цивільних будівель і складних інженерних об'єктів має небезпечні тенденції: складність зростає, а проекти нерідко виконуються фахівцями, що володіють потужними обчислювальними системами, але вони не мають достатніх знань для кваліфікації нестандартних систем. Пропонована стаття має звернути увагу фахівців на необхідність удосконалення культури проектування

та освоєння нових задач, призначених для забезпечення безпеки у галузі будівництва.

ЛІТЕРАТУРА

1. Єврокод-2 і Єврокод-8 для проектування сейсмостійких споруд / Бамбура А. М., Немчинов Ю. І., Гурківський О. Б. та ін. Міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції». Київ : ДП НДІБК, 2012. № 76. С. 353–360.
2. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства : монография. Київ : Изд-во «Сталь», 2014. 301 с.
3. Барабаш М. С., Гензерський Ю. В., Покотило Я. В. Методи мінімізації ймовірності прогресуючого руйнування висотної будівлі при дії сейсмічних навантажень. Науково-технічний журнал: *Нові технології в будівництві*. 2011. № 1 (21). С. 17–23.
4. Барабаш М. С., Городецкий А. С. Некоторые аспекты расчета зданий на устойчивость к прогрессирующему разрушению. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. научн. тр. Дн-вск : ПГАСА, 2009. № 50. С. 157–162.
5. Барабаш М. С., Кирьязов П. Н., Ромашкина М. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного жилого здания при взрыве бытового газа внутри помещения. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2016. Vol. 12. Iss. 1. P. 73–85.
6. Barabash M. Issues of Resistance to Progressive Failure of Load-Bearing Systems in Lira-Saprr Software. *Advances in Science and Technology*. 2022. Vol. 114. P. 17–25.
7. Barabash M. Some aspects of modelling nonlinear behaviour of reinforced concrete. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. № 100. P. 164–171.
8. ДБН В.1.2-2:2006 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування».
9. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія».
10. Кір'язев П. М., Барабаш М. С., Ромашкіна М. А. Спосіб чисельного моделювання конструкцій висотної споруди в нелінійній постановці. *Нові технології в будівництві* : науково-технічний журнал. 2013. № 25–26. С. 67–70.

REFERENCES

1. Evrokod-2 i Evrokod-8 dlya proektuvannya seysmostiykih sporud (Evrokod-2 and Evrokod-8 for design earthquake-resistant structures) / Bambura A. M., Nemchinov, Yu., Gurkivskiy, O., et al. "Budivelnii konstruksii". Kyiv : DP NDIBK, 2012. № 76. S. 353–360.
2. Barabash, M. S., Kir'yazev, P. N., Romashkina, M. A. Chislenoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zhilogo zdaniya pri vzryve bytovogo gaza vnutri pomeshheniya (Numerical simulation of the stress-strain state of a brick residential building in a domestic gas explosion indoors). *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2016. Vol. 12. Iss. 1. P. 73–85.
3. Problemi protidi'yi konstrukciji progresuyuchomu obvalennyu budi'vel' ta sporud (Problems of counteraction of structures to progressive collapse of buildings and structures) / M. S. Barabash, V. M. Pershakov, A. O. Byelyatinskij, K. M. Lisnycz'ka. *Budi'vnicztvo Ukrayini*. 2015. № 4. P. 28–31.
4. Barabash, M. Some aspects of modelling nonlinear behaviour of reinforced concrete. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. № 100. P. 164–171.
5. Barabash, M. S. Komp'yuternoe modelirovanie procesov zhiznennogo zikla ob'ektov stroitelstva (Computer's simulation building structures life cycle) : monografiya. Kyiv : "Stal", 2014. 301 c.
6. Barabash M. Issues of Resistance to Progressive Failure of Load-Bearing Systems in Lira-Sapr Software. *Advances in Science and Technology*. 2022. Vol. 114. P. 17–25.
7. Barabash, M. S., Gorodetskiy, A. S. Nekotorie aspekti rascheta zdaniy na ustoychivost k progresiruyushemu razrusheniyu (Some aspects of calculation buildings for resistance to progressive collapse). *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie*. Dnepr : PGASA, 2009. № 50. S. 157–162.
8. DBN B.1.2-2:2006 "Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeki budivelnih ob'ektiv. Navantazennya i vplyvi. Normy proektuvannya" (The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. Loads and influences. Design standards).
9. DSTU-N B V.1.1-27:2010 "Zahist vid nebezpechnih geologichnih procesiv, shkidlyvyh ekspluatatsiy nih vplyvyv, vid pozhezhi. Budivelnna klimatologiya" (Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, from fire. Building climatology).
10. Kir'yazev, P. N., Barabash, M. S., Romashkina, M. A. Sposib chislenogo modelyuvannya konstruktsiy visotnoi sporudi v neliniyniy postanovtsi (The method of numerical modeling of high-rise structures in a non-linear setting). *Novi tehnologii v budivnitstvi* : naukovu-tehnichniy jurnal. 2013. № 25–26. S. 67–70.