

УДК 693.972:69.059.28

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ НА ПРОГРЕСУЮЧЕ ОБВАЛЕННЯ ОДНОПОВЕРХОВИХ КАРКАСНИХ ВИРОБНИЧИХ БУДІВЕЛЬ ТА ПОШУК МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗРАХУНКІВ

РАДКЕВИЧ А. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,

ДАВИДОВ І. І.^{2*}, *канд. тех. наук, доц.*,

ЧАБАН В. П.³, *канд. тех. наук, доц.*,

КОВТУН К. А.⁴, *аспір.*

¹ 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: a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID ID : 0000-0001-6325-8517

^{2*} Кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (0562) 46-93-62, e-mail: davydov.ihor@pdaba.edu.ua, ORCID ID : 0000-0002-0948-1299

³ Кафедра металевих та дерев'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (0562) 46-93-62, e-mail: chaban.viacheslav@pdaba.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

Анотація. Проблеми аналізу прогресуючого обвалення будівель стали невід'ємною частиною проектування. Проте досі норми проектування не дають чітких критеріїв алгоритму розрахунку при аналізі миттєвого руйнування (обвалення) конструкцій будівлі. У статті обговорюються проблеми та невизначеності постановки задачі аналізу миттєвого руйнування конструкцій. Для ілюстрації невизначеності застосування методів аналізу будівель на прогресуюче обвалення відповідно до вимог різних нормативів наводяться приклади розрахунку існуючих одноповерхових каркасних виробничих будівель. Для аналізу застосовуються програмні комплекси SCAD Office та ЛІРА-САПР. Порівнюються результати розв'язання динамічної задачі в часовій області при заданні різного часу перерозподілу реакції та результати квазістатичного розрахунку з різними динамічними коефіцієнтами. Виконується порівняння теоретичних результатів прогнозування непропорційної руйнації та фактичного обвалення конструкцій виробничої будівлі, яка була пошкоджена ракетними ударами. Аналізуються наявність важливих розбіжностей результатів розрахунку та їх причини. **Мета статті** – аналіз основних особливостей, що виникають при проектуванні (підсиленні) конструкцій промислових будівель, з врахуванням можливостей їх локальних руйнувань. **Висновок.** Розглянуто деякі проблеми, які треба вирішувати під час проектування або реконструкції промислових будівель, експлуатація яких може бути пов'язана з тими чи іншими локальними руйнуваннями несних конструкцій. Наводяться перспективні конструктивні шляхи ефективного вирішення цих проблем.

Ключові слова : *прогресуюче обвалення; каркас будівлі; ферми; залізобетонні конструкції; вузли-зв'язки*

ANALYSIS OF CALCULATION METHODS FOR PROGRESSIVE COLLAPSE OF SINGLE-STOUREY FRAME INDUSTRIAL BUILDINGS AND SEARCH FOR OPPORTUNITIES TO IMPROVE THE ACCURACY OF CALCULATIONS

RADKEVICH A.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

DAVIDOV I.I.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

CHABAN V.P.³, *Ph. D., Assoc. Prof.*,

KOVTUN K.A.⁴, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Construction Technology and Geodesy, Ukrainian State University of Science and Technology, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (0563) 73-15-44, e-mail: a.v.radkevich@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6325-8517

^{2*} Department of Metal and Wooden Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (0562) 46-93-62, e-mail: davydov.ihor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

³ Department of Metal and Wooden Structures, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (0562) 46-93-62, e-mail: chaban.viacheslav@pdaba.edu.ua, ORCID ID : 0000-0002-0948-1299

⁴ Department of Construction Technology and Geodesy, Ukrainian State University of Science and Technology, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (0563) 73-15-44

Abstract. The issues of analysing the progressive collapse of buildings have become an inseparable part of design. However, design standards still do not provide clear criteria for the calculation algorithm in the analysis of instantaneous collapse of building structures. The article discusses the problems and uncertainties of formulating the problem of analysing the instantaneous collapse of structures. To illustrate the uncertainty of applying building analysis methods to progressive collapse in accordance with the requirements of various standards, examples of calculations of existing one-storey frame industrial buildings are given. SCAD Office and LIRA-SCAD software packages are used for the analysis. The results of the solution of the dynamic problem in the time domain are compared with the setting of different times of redistribution of the reaction and the results of the quasi-static calculation with different dynamic coefficients. A comparison is made between the theoretical results of predicting disproportionate destruction and the actual collapse of the structures of the industrial building that was damaged by missile strikes. The presence of important discrepancies in the calculation results and their causes are analyzed. *The purpose of the article* is to analyze the main features that arise when designing (reinforced) structures of industrial buildings, taking into account the possibility of their local destruction. *Conclusion.* The article considers some problems that must be solved during the design or reconstruction of industrial buildings, the operation of which may be associated with one or another local destruction of the bearing structures. Prospective constructive ways of effectively solving these problems are presented.

Keywords: *progressive collapse; building frame; trusses; reinforced concrete structures; connecting joints*

Обговорення проблеми розрахунку конструкцій на прогресуюче обвалення відбувається вже понад 20 років [1–10]. Сьогодні розрахунки на прогресуюче обвалення – необхідний елемент у проектуванні нових або аналізі технічного стану існуючих будівель класів наслідків СС2 та СС3 (згідно з п. 4.3 ДБН В.1.2-14:2018).

Це вимагає додаткових, достатньо трудомістких, розрахунків, які повинні обґрунтувати неможливість появи прогресуючого руйнування для вже існуючих будівель і споруд. Досягнути цього можна за допомогою додавання у конструктивну схему споруди елементів категорії відповідальності А1 (відповідно до п. 5.2.5 ДБН В.1.2-14:2018). При цьому, згідно з вимогами п. 5.2.4 ДБН В.1.2-14:2018, існує певна «шпарина», що дає можливість не використовувати елементі категорії А1 – за наявності обґрунтованих запасів несної здатності конструкцій та їх вузлів.

Проблема полягає у тому, що в існуючих нормах відсутні чіткі критерії, які б дозволяли визначити джерело миттєвих

руйнувань конструкцій будівель звичайного призначення. Наприклад, у разі звичайних механічних пошкоджень конструкцій можливість миттєвого обвалення малоімовірна (якщо ця конструкція не мала попередніх деформацій). Тоді можна припустити, що за відсутності в будівлі вибухонебезпечних процесів або інших джерел, які можуть спричинити миттєве обвалення, відповідно до п. 5.2.5 ДБН В.1.2-14:2018 допускається не вводити елементів категорії А1?

Чіткої відповіді на це питання немає. Крім того, для небезпечних виробництв уже існують рекомендації з часткової нейтралізації шкоди від вибухової хвилі (наприклад, улаштування конструкцій легко скидного стінового огороження та покрівлі). А для захисту від можливих наїздів рухомого транспорту на конструкції можна проектувати обмежувачі руху або робити «набетонки» навколо колон чи біля стін.

Окрім цього, виникає ще одне питання: а чи завжди доцільно виконувати додаткові конструктивні заходи із створення резервів несної здатності? Наприклад, якщо

джерелом миттєвого руйнування конструкцій став теракт, або влучання снарядів і ракет – без конкретного значення розміру та інтенсивності (кількість ракет або періодичність їх влучань в об'єкт). У цьому випадку найбільш ефективними методами захисту від прогресуючого обвалення буде влаштування зовнішніх захисних конструкцій (типу ковпаків чи навісів), охорона об'єкта та протиракетна оборона.

Але відмовлятися від виконання вимог національних стандартів проектувальник не має права. Тому спробуємо на прикладах існуючих об'єктів розглянути, як автори проводили аналіз певних об'єктів на прогресуюче обвалення.

Як інструменти, за допомогою яких проводили аналіз напружено-деформованого стану конструкцій будівель, використано програмні комплекси SCAD Office и ЛИРА-САПР.

Основні особливості розрахунку конструкцій на прогресуюче обвалення будівельних конструкцій у програмних комплексах та основна ідея полягають в реалізації декількох стадій розрахунку [6–9]. На першому етапі виконується розрахунок за лінійною схемою – це дозволяє отримати розподіл зусиль і деформацій в елементах конструкції. На другому етапі послідовно виключаються з роботи окремі несні елементи (як правило – колони, фрагменти несних стін та ін.) і визначаються найбільш несприятливі варіанти завантаження конструкцій.

У подальшому проводиться розрахунок прийнятої моделі за нелінійною схемою з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності. Під час розрахунку виконується покрокова корекція до стану, коли відбувається руйнування конструкції – або змінюється геометрична схема

конструкції, або відбувається різке зростання деформацій та переміщень.

Під час розрахунку конструкцій на прогресуюче обвалення формується нова розрахункова схема, в якій зруйновані елементи вже відсутні. Замість реакцій у вузлах конструкцій, що вийшли з ладу (тобто ті, що були видалені), в розрахункову схему додаються навантаження із протилежним значенням і, крім того, додатково враховують навантаження від ваги конструкцій, які обвалилися.

Розглянемо конструктивну схему каркаса будівлі в межах деформаційних блоків у вигляді 11 поперечних рам, які мають три прогони. Крок рам складає 12 м. Вузли приєднання ферм до колон – шарнірні, вузли приєднання колон до фундаментів – жорсткі.

Просторова жорсткість будівлі у поздовжньому напрямку забезпечується системою вертикальних в'язей по колонах і по фермах покриття, а також наявністю жорсткого диска покриття (який створено із залізобетонних плит покриття). В поперечному напрямку жорсткість забезпечена роботою поперечних рам каркаса (рами складаються з колон ригелів покриття).

Фундаменти колон – палі залізобетонні. Покриття запроектовано з використанням залізобетонних сегментних ферм за рекомендаціями типової серії 1.463.1-3/87 та мають прогін 24 м. По сегментних фермах покладені збірні залізобетонні плити за типовою серією 1.465.1-3/80, які мають розміри в плані 3×12 м. Колони збірні залізобетонні, за типовою серією 1.424.1-6/89. Стінове огороження – легкобетонні навісні панелі, товщина стінових панелей 250 мм.

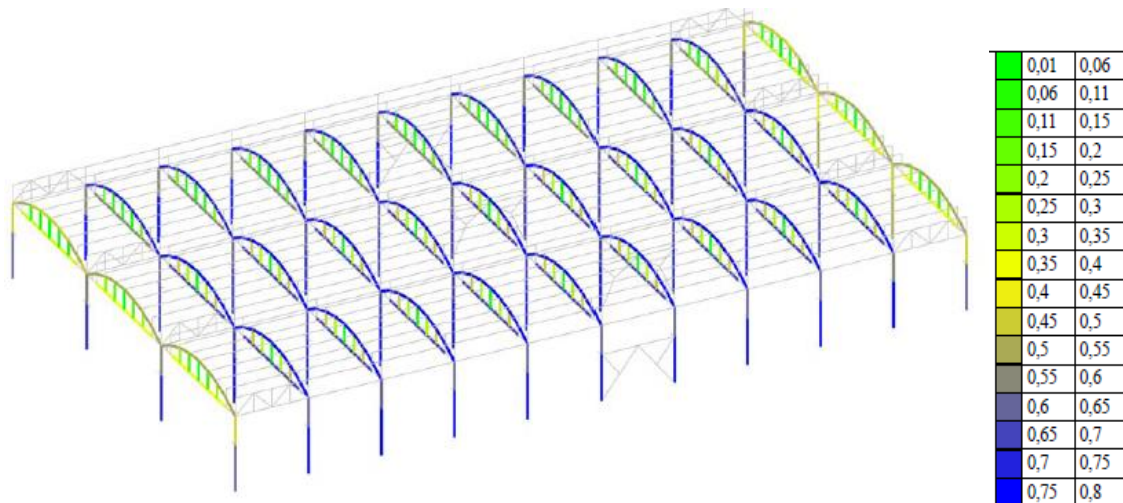


Рис. 1. Схема розподілу коефіцієнтів використання – для елементів ферм і колон каркаса

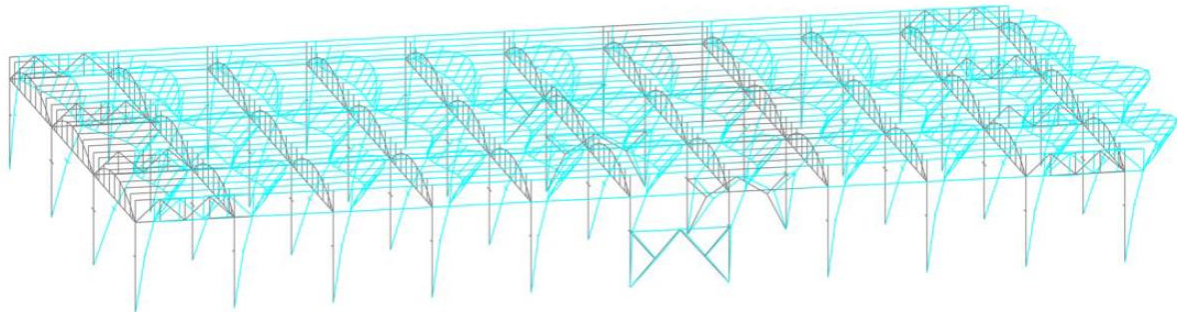


Рис. 2. Схема деформації каркаса будівлі за першою формою вільних коливань (період 3.9 сек)

«Миттєва» відмова колон створює аварійну ситуацію, яка має невелику тривалість. При цьому після руйнування елемента каркаса відбуваються тимчасові процеси, пов'язані з переходом від сталого стану «неушкодженої» системи до нового сталого стану. Цей перехід породжує коливання непошкоджених елементів несних конструкцій і коливання внутрішніх напружень у перерізах цих елементів.

За рекомендацією американських норм «Progressive collapse analysis and design guideline (GSA. 2013)» $t_{omk} < 0,1T$ (де T – період першої форми власних коливань конструкції без елемента, який зруйновано, і за формою коливань, що нагадує статичну деформацію), у прикладі, який розглядається в статті, $t_{omk} = 3.9/10 = 0,39$ сек. Згідно з довідником із розрахунками на динамічні впливи Б. Г. Коренева та І. М. Рабіновича, за аналогією з розрахунком на удар, якщо не можна оцінити час впливу, то можна

приймати в запас міцності та жорсткості конструкції з $t_{omk} = 0.001$.

Крок інтегрування призначаємо з міркувань $(0,01-0,001)T_1$, де T_1 – період основного тону. Якщо про динамічну поведінку конструкції нічого не відомо, крок видачі результатів рекомендується призначити рівномірним приблизно через 50–100 кроків інтегрування у часі.

При складанні основних сполучень навантажень коефіцієнт надійності навантаження для постійних, тривалих і короточасних навантажень приймаємо рівним одиниці, якщо немає якогось епізодичного навантаження. Для аварійних сполучень коефіцієнти сполучення для тривалих навантажень дорівнюють: $\Psi_{11} = 1,0$; $\Psi_{12} = \Psi_{13} = \dots = 0,95$. Для аварійних сполучень коефіцієнти сполучень для всіх короточасних навантажень приймаються рівними $\Psi = 0,8$. В особливих сполученнях навантажень, що включають вибухові впливи, навантаження, що викликаються пожежею, зіткненням транспортних засобів

з частинами споруд, короточасні навантаження допускається не враховувати. Для аварійних сполучень коефіцієнти сполучень для короточасних навантажень $\Psi_t = 0,5$.

Розрахункові характеристики міцності матеріалів приймають рівними їх нормативним значенням.

Коефіцієнт надійності з відповідальності слід приймати рівним $\gamma_n = 1,0$.

Нормативні характеристики опору матеріалів для бетонних та залізобетонних конструкцій слід множити на додатковий коефіцієнт умов роботи $\gamma_c = 1,15$, який буде враховувати особливості граничного стану конструкцій після теракту.

Прогини елементів конструктивної системи, що згинаються, для особливого граничного стану, за умови забезпечення

мінімально допустимої довжини зони спирання, у всіх випадках не повинні перевищувати $1/50$ довжини прогону. Коефіцієнт умов роботи особливого граничного стану для пластичних сталей, які мають межу текучості, слід приймати рівним $\gamma_c = 1,1$.

За результатами розрахунків конструкцій на задані аварійні ситуації, які враховують миттєву відмову несної колони крайнього або середнього ряду, стійкість до лавино подібного руйнування не забезпечена. У цьому випадку за межами зони руйнування у найбільш навантажених елементах колон і ферм покриття внутрішні напруження перевищують допустимі значення.

На рисунках 3 і 4, наведено схему розподілу коефіцієнтів використання для несних конструкцій ферм і колон каркаса.

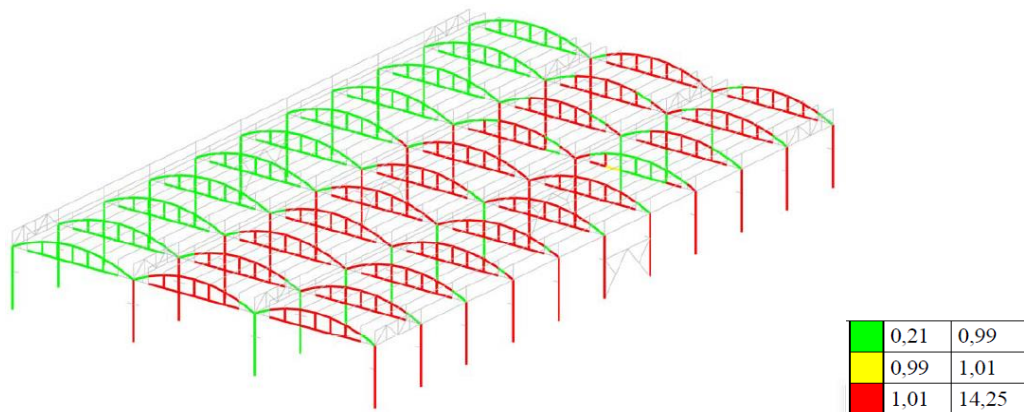


Рис. 3. Схема розподілу коефіцієнтів використання для несних конструкцій ферм і колон каркаса за миттєвого руйнування колони середнього ряду

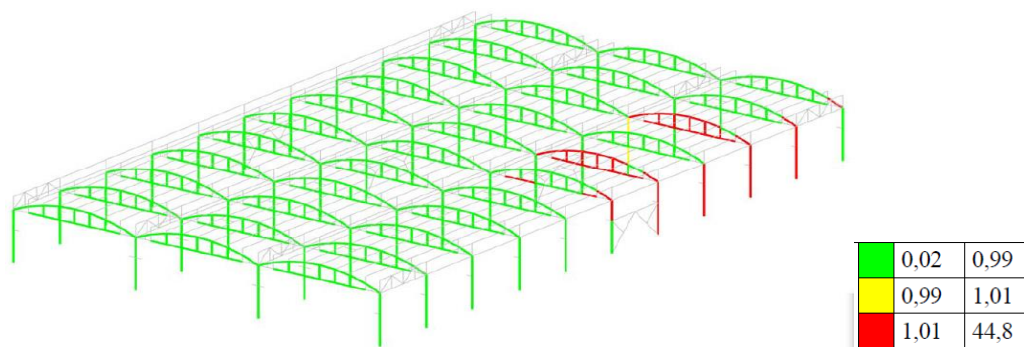


Рис. 4. Схема розподілу коефіцієнтів використання для несних конструкцій ферм і колон каркаса за миттєвого руйнування колони крайнього ряду (червоним кольором позначені елементи, міцність яких перевищена)

Подібний аналіз проведено для будівлі бетонозмішувального цеху, яка була

пошкоджена в 2022 р. внаслідок двох ракетних ударів по будівлі в Дніпропетровській області.

Конструктивна схема основної частини будівлі виконана у вигляді просторового каркаса, що працює за рамно-в'язевою схемою. Каркас складається з поперечних рам, установлених із кроком 12 м і розв'язаних із площини зв'язковими конструкціями. У поперечному напрямку жорсткість каркаса забезпечується роботою поперечних рам. Жорсткість поперечних рам забезпечена жорстким затисканням колон у фундаменти. У поздовжньому напрямку жорсткість каркаса забезпечена роботою сталевих вертикальних в'язей хрестового типу по колонах.

Жорсткість диска покриття забезпечується кріпленням плит покриття до

ферм. Колони виконані збірні залізобетонні в опалубці серії КЄ-01-49. По торцях виконані залізобетонні фахверкові стійки в опалубці серії КЄ-01-55. Сталеві в'язі по колонах хрестового типу виконані за серією КЄ-01-55. По колонах укладені залізобетонні сегментні кроквяні ферми покриття прогоном 18 м в опалубці серії ПК-01-129/68. Заповнення покриття виконане із збірних залізобетонних ребристих плит за серією 1.465-3. Покрівля багатошарова тепла рулонна. Стінова огорожа будівлі виконана з навісних стінових легкобетонних панелей за серіями 1.432-5 та 1.432-3. Товщина стінових панелей складає 200 мм. Підкранові балки виконані сталевими, розрізними і мають прогін 12 м (за серією 1.426.2-3).



Рис. 5. Руйнування конструкцій будівлі (внаслідок ракетного удару)

Розрахунковий аналіз можливого обвалення плит і ферм дозволив зробити висновок, що у даному випадку лавино подібного обвалення конструкцій, розташованих у зоні руйнування, не відбувається. За фактом проведеного обстеження встановлено, що після обвалення ферми в одному прогоні після ракетного удару відбулося обвалення двох кроквяних ферм покриття у двох сусідніх прогонах.

Аналіз отриманих результатів показав, що результати розподілу зусиль і деформацій при динамічному розрахунку в лінійній постанові принципово не відрізняється від результатів розрахунку за квазістатичною схемою.

Але метод квазістатичного розрахунку, за якого динамічний ефект моделюється додатком реакції втраченої в'язі (тобто зруйнованої конструкції) зі зворотним знаком і коефіцієнтом динамічності 2, дає

більші значення зусиль, ніж за результатами динамічного розрахунку

Порівняння результатів розв'язання динамічної задачі в часовій області при завданні різного часу перерозподілу реакції у втраченій в'язі із $t_{отк} = 0.001-0.040$ показало, що зусилля в елементах конструктивної системи міняються незначно.

Порівняння динамічного та квазістатичних методів з урахуванням фізичної нелінійності приводить до зниження динамічних зусиль.

Для того, щоб результати квазістатичного розрахунку збіглися з даними динамічного розрахунку і їх можна було б порівнювати, коефіцієнт динамічності повинен дорівнювати 1,3.

Необхідно звернути увагу на той факт, що різні варіанти моделювання аварійних ситуацій, в яких прогноуються можливі варіанти руйнування конструкцій, виявились не схожими з фактичними випадками реальних руйнувань.

Спробуємо проаналізувати фактори, які суттєво впливають на результати розрахунку. Часто відсутні: проектна документація у повному обсязі; наявність документації не завжди гарантує відповідність фактичних параметрів матеріалу, перерізів, вузлів і з'єднань проектній документації.

Інформація про інженерно-геологічні параметри ґрунтової основи, технологічні навантаження та інша, як правило, застаріла. В нормах відсутні будь-які вимоги або рекомендації щодо створення розрахункової моделі і кількості розрахункових аналізів, за поодинокими випадками [4; 6]. Наприклад, видаленням яких елементів і в якій кількості – таку задачу має розв'язувати проектувальник самостійно.

Далі виникає питання, пов'язане з моделюванням навантажень – статичний,

динамічний, квазістатичний чи кінематичний метод граничної рівноваги; яке значення динамічного коефіцієнта призначити; чи є потреба включати в просторову схему елементи стінового заповнення і покрівлі, розглядати лінійну чи нелінійну роботу елементів моделі?

Зрозуміло, що з позиції «стандартного інженерного розрахунку» в статичній постанові все, що ми спрощуємо у розрахунковій схемі йде «в запас» – і це добре. Але з курсу «Будівельна механіка» відомо, що кожна додаткова в'язь бере участь у роботі системи і чинить опір навантаженням, тоді як з точки зору динаміки, з позиції резонансних режимів роботи, найбільш важливим є максимально точний перерозподіл мас і жорсткостей конструктивних елементів у просторовій системі.

Таким чином, розбіг у результатах може бути зумовлений тим, що при постановці задачі не визначено основні вимоги до неї, або низька якість моделювання та враховуються не всі ефекти взаємодії конструкції з основами та суміжними підсистемами конструкцій.

Суттєвого якісного перерозподілу зусиль не виявлено також і в квазістатичному та динамічному розрахунках, як у лінійній, так і в нелінійній постановці для каркасних будівель, які розглядалися у наведених прикладах.

Висновки

Для підвищення точності під час моделювання задач при розрахунку на прогресуюче обвалення рекомендується розвивати комплекс діагностики, динамічних випробувань (для уточнення фізичних і динамічних характеристик об'єкта) та моделювання його з урахуванням цих характеристик [10].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Belostotsky A. M., Karpenko N. I., Akimov P. I., Sidorov V. N. Learning from the progressive collapse of buildings. *Developments in the Built Environment*. Vol. 15. October, 2023. P. 100194.
2. Karpenko S. N., Petrov A. N., Kaytukov T. B., Kharitonov V. A. About development of methods of analysis and assessment of vulnerability of spatial plate-shell reinforced concrete structures with allowance for physical nonlinearities, crack formation and induced anisotropy. *International Journal for Computational Civil and Structural*

Engineering. 2018. Vol. 14, № 2. Pp. 30–47. URL: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47>
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100194> 71

3. Li S., Shan S., Zhai C., Xie L. Experimental and numerical study on progressive collapse process of RC frames with full-height infill walls. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 59. Pp. 57–68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.020>

4. Барабаш М. Методика моделювання прогресивного обрушення на прикладі реальних висотних будівель. *MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS SCIENCE – FUTURE OF LITHUANIA*. 2014. № 6 (5). С. 520–530.

5. Yu J., Tan K.-H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Engineering Structures*. 2013. Vol. 55. Pp. 90–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.040>

6. Перельмутер А. В., Криксунов Э. З., Мосина Н. В. Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса “SCAD Office”. *Инженерно-строительный журнал*. 2009. Т. 4, № 2. С. 13–18.

7. МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях. 2008.

8. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defense USA, 2005.

9. Городецкий А. С., Батрак Л. Г., Городецкий Д. А., Лазнюк М. В., Юсипенко С. В. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. Киев : «ФАКТ», 2004.

10. Давыдов И. И. Особенности расчета и защиты строительных конструкций от прогрессирующего обрушения. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 11. С. 38–46.

REFERENCES

1. Belostotsky A.M., Karpenko N.I., Akimov P.I. and Sidorov V.N. Learning from the progressive collapse of buildings. *Developments in the Built Environment*. Vol. 15. October, 2023. P. 100194.

2. Karpenko S.N., Petrov A.N., Kaytukov T.B. and Kharitonov V.A. About development of methods of analysis and assessment of vulnerability of spatial plate-shell reinforced concrete structures with allowance for physical non-linearities, crack formation and induced anisotropy. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018, vol. 14, no. 2, pp. 30–47. URL: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-30-47>
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100194> 71

3. Li S., Shan S., Zhai C. and Xie L. Experimental and numerical study on progressive collapse process of RC frames with full-height infill walls. *Engineering Failure Analysis*. 2016, vol. 59, pp. 57–68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.020>

4. Barabash M. *Metodika modelirovaniya progressivuyushchego obrusheniya na primere real'nykh vysotnykh zdaniy* [Methodology for modeling progressive collapse using the example of real high-rise structures]. *MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS SCIENCE – FUTURE OF LITHUANIA*. 2014, vol. 6 (5), pp. 520–530. (in Russian).

5. Yu J. and Tan K.-H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Engineering Structures*. 2013, vol. 55, pp. 90–106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.040>

6. Perelmuter A.V., Kryksunov E.Z. and Mosyna N.V. *Realizatsiya rascheta monolitnykh zhilykh zdaniy na progressivuyushcheye (lavinoobraznoye) obrusheniye v srede vychislitel'nogo kompleksa “SCAD Office”* [Realization of calculation of monolithic dwellings subjected to progressive (avalanche-like) collapse in the middle of the computing complex “SCAD Office”]. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal* [Engineering and Construction Journal]. 2009, vol. 4, no. 2, pp. 13–18. (in Russian).

7. *MDS 20-2.2008. Vremennyye rekomendatsii po obespecheniyu bezopasnosti bol'sheproletnykh sooruzheniy ot lavinoobraznogo (progressivuyushchego) obrusheniya pri aviarynykh vozdeystviyakh* [MDS 20-2.2008. Temporary recommendations for ensuring the safety of long-span structures from avalanche-like (progressive) collapse during emergency impacts]. 2008. (in Russian).

8. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Department of Defense USA, 2005.

9. Horodetskyi A.S., Batrak L.G., Horodetskyi D.A., Laznyuk M.V. and Yusypenko S.V. *Raschet i proyektirovaniye konstruktivnykh vysotnykh zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona* [Calculation and design of high-rise structures made of monolithic reinforced concrete]. Kyiv: “FACT Publ.”, 2004. (in Russian).

10. Davydov I.I. *Osobennosti rascheta i zashchity stroitel'nykh konstruktivnykh ot progressivuyushchego obrusheniya* [Features of calculation and protection of construction 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).

Надійшла до редакції: 01.04.2024.