

Голові разової спеціалізованої ради PhD 67.192
Київського національного університету
будівництва і архітектури
доктору технічних наук, професору
Лізунову Петру Петровичу

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук,
професора, завідувача кафедри міського будівництва та господарства
Національного університету водного господарства та природокористування
Кочкарьова Дмитра Вікторовича
на дисертаційну роботу Фесуна Ігоря Костянтиновича на тему «**Скінченно-елементне моделювання процесу прогресуючого обвалення будівель і споруд в просторово-нелінійній постановці**» представлену на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія галузі знань 19 Архітектура та будівництво

1. Обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи

Сучасні умови проєктування та експлуатації будівель і споруд характеризуються зростанням вимог до їхньої безпеки, надійності та живучості в умовах дії надзвичайних і аварійних впливів. Особливої актуальності набуває забезпечення здатності конструктивної системи зберігати несучу здатність і запобігати поширенню локального пошкодження на значну частину або всю будівлю. Одним із найбільш небезпечних сценаріїв такого розвитку є прогресуюче обвалення будівель і споруд. Прогресуюче обвалення є складним фізичним процесом, за якого локальне руйнування одного або декількох несучих елементів спричиняє перерозподіл зусиль у конструктивній системі, виникнення додаткових динамічних ефектів і, за недостатньої живучості споруди, послідовне руйнування суміжних конструкцій. Причиною ініціації такого процесу можуть бути вибухові та ударні впливи, пожежі, техногенні аварії, помилки під час проєктування або

будівництва, а також інші позапроектні впливи. Особливість прогресуючого обвалення полягає в тому, що масштаб кінцевого руйнування може суттєво перевищувати первинну зону пошкодження.

Особливої актуальності проблема прогресуючого обвалення набула в Україні внаслідок повномасштабної війни. Значна кількість будівель і споруд зазнає локальних пошкоджень унаслідок вибухових, ударних та інших аварійних впливів. При цьому фактичний сценарій пошкодження конструкцій часто суттєво відрізняється від спрощених розрахункових моделей, у яких аварійна ситуація моделюється лише шляхом раптового видалення одного несучого елемента. Аналіз реальних аварійних ситуацій показує, що первинний вплив може одночасно спричиняти руйнування декількох елементів, пошкодження суміжних конструкцій та зміну навантаження на основну несучу систему. У свою чергу, руйнування огорожувальних конструкцій може призводити до миттєвого розвантаження окремих елементів і, відповідно, істотно змінювати подальшу динамічну реакцію споруди.

Водночас сучасні підходи до оцінювання стійкості будівель і споруд до прогресуючого обвалення значною мірою ґрунтуються на спрощених розрахункових припущеннях. Зокрема, традиційне моделювання часто передбачає незалежність розрахункового сценарію від конкретної причини аварійної події та зводить її наслідки до раптового видалення одного несучого елемента. Такий підхід не завжди дозволяє адекватно відтворити послідовність фактичних пошкоджень і відповідний перерозподіл навантажень у конструктивній системі. Додатковою проблемою є наявність розбіжностей між результатами нормативного або спрощеного чисельного моделювання та фактичним станом конструкцій після аварійного впливу.

Таким чином, актуальною науково-практичною проблемою є вдосконалення методів оцінювання стійкості будівель і споруд до прогресуючого обвалення шляхом переходу від спрощеного розгляду факту локального руйнування до моделювання реального сценарію аварійного

впливу та його наслідків. Розв'язання цієї проблеми дозволить підвищити достовірність оцінювання живучості конструктивних систем, обґрунтованість проєктних рішень та ефективність заходів щодо запобігання прогресуючому обваленню будівель і споруд.

2. Обґрунтування зв'язку із науковими програмами, планами й темами

Результати дисертаційного дослідження використані під час виконання держбюджетної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України № 2ДБ-2024 «Створення нових та удосконалення існуючих алгоритмів скінченно-елементного динамічного аналізу параметрів граничних станів будівель і споруд» (номер державної реєстрації 0124U001147; наказ МОН України № 1572 від 27.12.2023 р., наказ КНУБА № 28 від 19.01.2024 р.) Науково-дослідного інституту будівельної механіки КНУБА.

3. Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність

Обґрунтованість наукових результатів і висновків забезпечується застосуванням методу скінченних елементів із урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей, динамічного характеру процесу та динамічного зміцнення матеріалів. Достовірність отриманих результатів підтверджено шляхом верифікації чисельних моделей за результатами трьох динамічних експериментальних досліджень прогресуючого обвалення залізобетонних і сталевих конструкцій. Достовірність запропонованої методики додатково підтверджено її апробацією на реальному об'єкті, що зазнав локальних руйнувань внаслідок вибухового впливу, шляхом зіставлення результатів чисельного моделювання з фактичним станом конструкцій після аварії.

Обґрунтованість запропонованого підходу визначається врахуванням не лише факту раптового видалення несучих елементів, а й пошкоджень суміжних конструкцій та зміни навантаження внаслідок руйнування огорожувальних конструкцій, що дозволяє адекватніше відтворювати реальний сценарій аварійного впливу. Сформульовані рекомендації та практичні положення ґрунтуються на результатах параметричних досліджень, експериментальної верифікації та апробації методики на реальному об'єкті, що забезпечує їх наукову обґрунтованість і практичну достовірність.

4. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано концептуальний підхід до моделювання сценаріїв прогресуючого обвалення, що базується на принципі врахування генезису аварійного впливу. На відміну від традиційного методу «раптового видалення» елемента, розроблений підхід дозволяє інтегрувати в динамічний розрахунок зону початкових руйнувань та зміну жорсткості суміжних конструкцій безпосередньо в момент обвалення, що суттєво підвищує достовірність прогнозування лавиноподібного руйнування.

2. Отримала подальший розвиток методика чисельної реалізації прямого інтегрування рівнянь руху в задачах нелінійної динаміки руйнувань. Обґрунтовано межі застосування та діапазони параметрів демпфування типу Релея для систем, що переходять у стан механізму. Це дозволило мінімізувати вплив нефізичної дисипації енергії на високих частотах та забезпечити стабільність обчислювального процесу без втрати пікових значень динамічних зусиль.

3. Дістали подальшого розвитку теоретичні положення щодо оцінки граничних станів матеріалів при імпульсних навантаженнях. На основі

верифікації чисельних моделей із натурними експериментами доведено необхідність коригування нормативних значень граничних деформацій для сталевих конструкцій у бік їх збільшення. Це дозволяє більш повно враховувати прихований резерв несучої здатності каркаса за рахунок пластичної стадії роботи матеріалу та мембранного ефекту перекриттів.

4. Сформовано комплексну багатоетапну методику розрахунку будівель і споруд на стійкість до прогресуючого руйнування, яка поєднує використання комбінованих скінченно-елементних моделей та енергетичний контроль балансу системи. Методика дозволяє скоротити обчислювальні витрати (до 60%) при збереженні точності результатів, необхідної для об'єктів найвищого рівня відповідальності (СС3).

5. Практичне значення результатів досліджень

Практичне значення роботи полягає в удосконаленні методології чисельного розрахунку будівель і споруд на стійкість до прогресуючого обвалення з урахуванням реального сценарію аварійного впливу та характеру спричинених ним пошкоджень. Запропонована методика дає змогу моделювати не лише раптове видалення одного або декількох несучих елементів, а й пошкодження суміжних конструкцій та пов'язану з цим зміну навантаження на конструктивну систему. Застосування методики дозволяє отримувати більш обґрунтовану оцінку живучості будівель і споруд та уточнювати параметри їхньої динамічної роботи в аварійних ситуаціях. Результати дослідження можуть бути використані під час проєктування нових будівель, оцінювання технічного стану та живучості існуючих об'єктів, а також під час обґрунтування проєктних рішень із запобігання прогресуючому обваленню. Запропоновані підходи також можуть бути використані для вдосконалення та актуалізації нормативних положень щодо розрахунку будівель і споруд на стійкість до прогресуючого обвалення.

6. Оцінка змісту та завершеності дисертаційної роботи

Дисертація складається із анотації, списку публікацій, вступу, чотирьох розділів із висновками, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 176 сторінки: основна частина – 146 сторінок.

Дисертаційна робота написана українською мовою з використанням технічно грамотної сучасної наукової термінології. Викладення матеріалу дисертації є логічним, а також відповідає вимогам до наукових праць.

У **першому** розділі проаналізовано сучасний стан проблеми забезпечення стійкості будівель і споруд до прогресуючого обвалення, розглянуто результати теоретичних та експериментальних досліджень, світові випадки прогресуючого обвалення та вимоги вітчизняних і закордонних нормативних документів. На основі проведеного аналізу визначено основні недоліки існуючих підходів, зокрема неврахування реального сценарію аварійного впливу, пошкоджень суміжних конструкцій та відмінностей між нормативними розрахунковими припущеннями і фактичними механізмами руйнування.

У **другому** розділі сформовано методологічні засади чисельного моделювання прогресуючого обвалення на основі методу скінченних елементів з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності, демпфування та динамічного зміцнення матеріалів. Запропоновано удосконалення традиційного підходу шляхом моделювання не лише факту раптового видалення несучого елемента, а й пошкоджень суміжних конструкцій, що виникають унаслідок аварійного впливу.

У **третьому** розділі виконано параметричні дослідження та верифікацію чисельних моделей прогресуючого обвалення на основі результатів трьох динамічних експериментальних досліджень залізобетонних і сталевих конструкцій. Встановлено оптимальні параметри чисельного моделювання та розроблено удосконалену методику динамічного розрахунку на стійкість до

прогресуючого обвалення, яка враховує фактичний стан пошкоджених конструкцій.

У четвертому розділі виконано апробацію розробленої методики на реальному об'єкті, що зазнав локальних руйнувань унаслідок аварійного, зокрема вибухового, впливу. Проведено порівняння результатів нормативного та удосконаленого чисельного моделювання з фактичним станом конструкцій після аварії, що підтвердило необхідність урахування реального характеру пошкоджень і розвантаження конструктивної системи для достовірної оцінки її стійкості до прогресуючого обвалення.

7. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 15 наукових праць. Основні положення дисертації висвітлено у 2 статтях, опублікованих у наукових фахових виданнях категорії «А», що індексуються у реферативній базі Web of Science, а також у 5 статтях, опублікованих у наукових фахових виданнях категорії «Б». Крім того, 8 публікацій подано у формі тез доповідей, представлених на національних та міжнародних наукових конференціях та симпозіумах.

8. Дотримання вимог академічної доброчесності

За результатами перевірки дисертаційної роботи Фесуна І.К., наявність ознак академічного плагіату встановлено коректність всіх посилань на першоджерела для текстових та ілюстрованих запозичень. Навмисних спотворень не виявлено. Порушення академічної доброчесності відсутні.

9. Дискусійні положення та зауваження до дисертації

1. У запропонованій методиці для прямого інтегрування рівнянь руху використано демпфування Релея, параметри якого визначаються через масову та жорсткісну складові. Для задач прогресуючого руйнування це є

суттєвим спрощенням, оскільки жорсткість конструкції змінюється в часі внаслідок пошкодження та видалення несучих елементів. При різкому зниженні власних частот жорсткісна складова демпфування може призводити до значного штучного збільшення дисипації енергії та, відповідно, до заниження динамічних зусиль. Особливо критичним це може бути в момент локального руйнування або утворення механізму, коли традиційна модель в'язкого демпфування не обов'язково адекватно відображає фізичні механізми дисипації енергії. Тому достовірність результатів потребує перевірки за енергетичним балансом із порівнянням енергії, що розсіюється демпфуванням Релея, з енергією пластичних деформацій та руйнування. Без такого аналізу залишається невизначеним, чи відсутність прогресуючого руйнування зумовлена реальною несучою здатністю конструкції, чи надмірною штучною дисипацією, введеною параметрами демпфування.

2. Висока швидкість деформування призводить до підвищення основних механічних характеристик матеріалів, разом з тим це часто призводить до зниження пластичності. Для прогресуючого руйнування це критично, зокрема бетон може стати міцнішим на стиск, але при цьому крихко руйнуватися без утворення пластичного шарніра. Тому разом із підвищенням міцності слід враховувати зміну діаграм деформування в частині їх граничної пластичності.

3. Висновок (п.3, висновків до розділу 3) про те що «лише системи з достатніми запасами необхідно розглядати в умовах прогресуючого руйнування є не вірним. Насправді, якраз системи з недостатніми запасами є найбільш небезпечними в контексті прогресуючого руйнування. Об'єкт має перевірятися незалежно від того, чи здається він «надійним» на стадії статичного розрахунку.

4. Висновок (п.3, висновків до розділу 3) про «надмірно занижені» граничні деформації в нормах потребує дуже обережного трактування. Чинні норми проектування (UFC, ДСТУ) спеціально занижують граничні

деформації, щоб забезпечити запас надійності на випадок дефектів зварювання, корозії або неоднорідності сталі.

5. У роботі (п.4, висновків до розділу 3) вказується на необхідність індивідуального підбору демпфувальних параметрів для кожного випадку є науково вразливим. Якщо для збіжності з експериментом №1 потрібні одні коефіцієнти α та β , а для експерименту №2 – інші, то така модель втрачає прогностичну здатність. Як дану методику використати на практиці якщо відсутні результати експерименту.

6. В роботі (п.5, висновків до розділу 3) вказується на скорочення часу розрахунку на 68%, але чи не втрачається при цьому точність у зонах стику? У стержнево-оболонкових моделях критичним місцем є вузол з'єднання, де стержень з'єднується з оболонкою.

Зазначені зауваження не знижують наукову та практичну цінність дисертаційної роботи, а підтверджують її актуальність та новизну.

10. Загальний висновок

Дисертаційна робота Фесуна Ігоря Костянтиновича на тему «Скінченно-елементне моделювання процесу прогресуючого обвалення будівель і споруд в просторово-нелінійній постановці» є самостійною, завершеною науковою працею, у якій розв'язано актуальну науково-технічну задачу з розроблення та обґрунтування удосконаленої методики чисельного оцінювання стійкості будівель і споруд до прогресуючого обвалення, яка, на відміну від традиційного підходу раптового видалення окремого несучого елемента, враховує реальний сценарій аварійного впливу, первинні пошкодження та руйнування суміжних конструкцій і пов'язану з ними зміну навантажено-деформованого стану конструктивної системи.

Дисертаційна робота Фесуна Ігоря Костянтиновича на тему «Скінченно-елементне моделювання процесу прогресуючого обвалення будівель і споруд в просторово-нелінійній постановці», представлена на здобуття наукового

ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – будівництво та цивільна інженерія, відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р., а її автор Фесун Ігор Костянтинович заслуговує присудження наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Офіційний опонент, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри міського будівництва та господарства
Національного університету
водного господарства та
природокористування

Дмитро КОЧКАРЬОВ



Олександр САН