

*Р. І. Майборода, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-3461-2959)
Ю. А. Отрош, д.т.н., професор, нач. каф. (ORCID 0000-0003-0698-2888)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ

Розроблена комп'ютерна модель, яка дозволяє оцінювати стійкість залізобетонної монолітної будівлі до прогресуючого обвалення під впливом комбінованої дії пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху. Для цього було створено просторову фізично та геометрично нелінійну модель шестиповерхової виробничої будівлі. Модель враховує сумісну роботу несучих конструкцій, зміну теплофізичних і механічних властивостей матеріалів під впливом підвищених температур, утворення локальних руйнувань, перерозподілу внутрішніх зусиль та динамічних ефектів від вибухового навантаження. Модель реалізована в програмному комплексі ЛІРА-САПР із використанням модуля «теплопровідність» для врахування температурного впливу режиму стандартної пожежі тривалістю 60 хвилин та налаштувань «динаміка в часі» для моделювання імпульсного навантаження від вибуху в 15 кПа. У результаті моделювання встановлено, що ізольована дія пожежі призводить до зростання прогинів плит перекриття у 2,6 рази, а внутрішній вибух – до збільшення прогину нижньої плити у 5,2 рази відносно нормального стану. Найбільшу небезпеку становить сценарій сумісного впливу пожежі та вибуху при якому прогин нижньої плити досягнув 55,8 мм, що перевищує початкове значення у 8,3 рази. Такі деформації при комбінованих діях, потенційно можуть викликати втрату несучої здатності конструкцій і розвиток прогресуючого обвалення будівлі. Отримані результати становлять основу для підвищення рівня конструктивної безпеки будівель та зменшення ризику втрат людських життів в умовах надзвичайних ситуацій. Запропонований підхід забезпечує можливість всебічного оцінювання стійкості залізобетонних монолітних будівель до прогресуючого обвалення за комбінованої дії термічних та вибухових навантажень, а також обґрунтування та реалізації ефективних заходів для підвищення їхньої надійності та живучості.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, пожежа, вибух, ЛІРА-САПР, комп'ютерна модель, комбінація навантажень

1. Вступ

Забезпечення надійності та безпеки будівельних конструкцій при дії надзвичайних ситуацій набуває особливої актуальності в умовах сучасних викликів. Однією з найнебезпечніших форм таких впливів є прогресуюче обвалення – каскадне руйнування значної частини будівлі, ініційоване локальним пошкодженням її окремих елементів. Серед причин, що можуть викликати таке пошкодження, особливе місце займають пожежі у поєднанні з внутрішніми вибухами, що супроводжуються різкими термомеханічними ефектами та нерівномірною деградацією конструктивних елементів [1].

Зокрема, дефлаграційні вибухи газоповітряних сумішей, які виникають у закритих або частково обмежених просторах приміщень, можуть створювати короточасні імпульсні навантаження високої інтенсивності. Поєднання дії таких вибухів із температурним впливом пожежі має значний вплив на конструкції, спричиняючи руйнування матеріалів, втрату зв'язків у вузлах та зниження несучої здатності [2, 3].

Наразі більшість наукових досліджень [4, 5] та нормативних документів [6, 7] розглядають вплив пожежі та вибуху на конструкції ізольовано, або спрощують взаємодію між ними. Недостатньо дослідженими залишаються аспекти розвитку аварії – як зміна температури, втрата жорсткості та міцності з плином часу приз-

водить до зміни механізмів руйнування. Особливо важливо враховувати просторову взаємодію елементів конструктивної системи – перекриттів, колон, вузлів з'єднання, які в умовах складних впливів не працюють незалежно, а утворюють єдину нелінійно–деформовану систему.

Таким чином, проблема забезпечення стійкості будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та вибуху є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

У своїх дослідженнях Shan S., Wang H., Li S., Wang B. [8] представлено прикладні розрахункові моделі для оцінки деформаційної здатності та опору прогресуючому обваленню залізобетонних каркасів, що можуть бути використані на етапі інженерного проєктування. Водночас у межах цієї роботи не враховано вплив високотемпературного навантаження та надлишкового тиску, що виникають у результаті пожежі або вибуху, на несучу здатність конструкцій.

У дослідженнях Білошицької Н., Білошицького М., Татарченко З. та Дячука Б. [9] реалізовано чисельний експеримент, спрямований на вивчення напружено–деформованого стану конструктивних елементів металевої етажерки. Розрахунки здійснювалися на основі розроблених математичних моделей із використанням технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) у середовищі програмного комплексу ЛПРА–САПР. Модель будівлі враховувала складні умови експлуатації, включаючи постійне та змінне навантаження, сейсмічні впливи, а також сценарії прогресуючого обвалення.

У статті [10] розроблено прикладну методику аналізу прогресуючого обвалення залізобетонних каркасних систем. Адекватність методики підтверджено шляхом дослідження сценарію руйнування типової багатоповерхової будівлі в м. Ер–Ріад під впливом вибухових хвиль. Водночас вплив пожежі або комбінованої дії «вибух – пожежа» не враховувався.

У роботі [11] представлено аналітичну модель оцінки потенціалу прогресуючого обвалення сталевих рами, яка зазнає комбінованого впливу вибуху та наступної пожежі. Модель враховує геометричні пошкодження конструктивних елементів, ефект навантаження–переміщення, втрату жорсткості в з'єднаннях, а також локальні зсуви колон під дією надлишкового тиску. Аналіз показав, що за комбінованого впливу вибуху та пожежі час втрати несучої здатності окремих елементів значно скорочується порівняно з випадком впливу лише пожежі. Однак інші конструктивні елементи, які можуть бути залучені до перерозподілу зусиль після втрати окремих опорних елементів, у роботі не розглядалися.

У статті [12] досліджено реакцію багатоповерхової будівлі на локалізований вибух, що призводить до виключення однієї з колон, а також до дії вибухового тиску на плиту перекриття, яка приймає на себе перерозподілене навантаження. Автори вказують, що досягнення граничного стану несучої здатності залежить не лише від цілісності колон, а й від деформативності плит перекриття над зоною пошкодження. Саме максимальна динамічна відповідь перекриття визначає вимоги до конструктивних з'єднань, які повинні зберігати пластичність для запобігання прогресуючому обваленню. Вплив термічного навантаження від пожежі після вибуху в дослідженні не враховувався.

Луссіопі В. з колегами [13] провели тривимірне чисельне моделювання руйнування залізобетонної будівлі під дією вибухового навантаження. У моделі були враховані колони, балки та цегляні стіни, що дало змогу відтворити послідовність

руйнування. Порівняння результатів моделювання з реальними фотографіями зруйнованої конструкції підтвердило адекватність чисельного підходу до прогнозування механізму прогресуючого обвалення під дією вибуху. Проте вплив пожежі у роботі не аналізувався.

Аналіз наявних досліджень свідчить про значний науковий інтерес до проблеми моделювання прогресуючого обвалення будівельних конструкцій, зокрема залізобетонних та сталевих каркасів, під впливом локального руйнування, вибухових навантажень і втрати окремих несучих елементів. У більшості наукових робіт моделювання здійснюється з використанням чисельних методів, що демонструють високу ефективність у прогнозуванні механізмів пошкоджень та розвитку обвалення.

Водночас спільним недоліком більшості розглянутих досліджень є відсутність врахування комбінованого впливу вибуху та пожежі, що є характерним для реальних аварійних ситуацій. Зокрема, у низці робіт ігнорується вплив високотемпературного навантаження на властивості матеріалів, втрата жорсткості та стійкості елементів конструкції після вибуху. Лише окремі дослідження частково враховують руйнування з'єднань, локальні зсуви колон та порушення просторової стійкості, однак ці ефекти, як правило, розглядаються без врахування температурної дії.

У відповідь на виявлені невирішені наукові завдання в роботі [14] запропоновано удосконалену методику, яка дає змогу здійснювати розрахунки та оцінювати стійкість будівель до прогресуючого обвалення за умов високотемпературного впливу пожежі та динамічного навантаження від внутрішнього дефлаграційного вибуху. Водночас залишається невирішеним питання програмної реалізації такої методики з оцінювання стійкості до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель під одночасною дією пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху з урахуванням сумісної роботи конструктивних елементів, зміни властивостей матеріалів внаслідок дії високих температур, втрати жорсткості у вузлах та ефектів перерозподілу внутрішніх зусиль, визначення прогинів та переміщень конструкцій.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є програмна реалізація оцінювання стійкості залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення, спричиненого впливом пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні завдання:

1. Визначити особливості розрахунку стійкості будівель до прогресуючого обвалення внаслідок дії пожежі та внутрішнього вибуху.

2. Розробити комп'ютерну модель у програмному комплексі ЛПРА–САПР для моделювання прогресуючого обвалення з урахуванням силових, високотемпературних впливів і тиску вибуху.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом досліджень є прогресуюче обвалення залізобетонних будівель при силових і високотемпературних впливах пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху. Предметом досліджень є напружено-деформований стан будівельних конструкцій при впливі високотемпературних чинників пожежі й силових від дефлаграційного вибуху. Основна гіпотеза дослідження – додатковий вплив надли-

шкового тиску дефлаграційного вибуху на будівельні конструкції піддані температурній дії певного періоду часу за стандартним температурним режимом пожежі збільшую ймовірність виникнення прогресуючого обвалення будівель. Для перевірки стійкості будівлі до прогресуючого обвалення, моделювання процесів вибуху та пожежі, розроблено та використано комп'ютерну модель на основі скінченних елементів в ЛІРА-САПР.

5. Визначення особливостей розрахунку прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху

Відповідно до удосконаленої методики розрахунку, повна аналітична методика розрахунку на вогнестійкість має враховувати роботу конструктивної системи за підвищених температур, можливий вплив тепла та сприятливі впливи активних і пасивних систем вогнезахисту, а також невизначеності, що пов'язані з цими трьома властивостями, та відповідальність конструктивної системи (наслідки руйнування), враховувати надлишковий тиск вибуху.

Розрахунок на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та вибуху допускається виконувати у квазістатичній постановці. За основу розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху взято положення будівельного розрахунку [15] з додатковим урахуванням комбінації випадкових розрахункових ситуації дефлагарційного вибуху (динамічне навантаження) та спричинена ним подальша пожежа чи навпаки.

Міцність і стійкість будівель в умовах пожежі та вибуху забезпечуються вогнестійкістю та вибухостійкістю її конструктивної системи за умови, що вогнестійкість і вибухостійкість окремих будівельних елементів та їх з'єднань не є нижчими за відповідні характеристики будівлі в цілому.

Для достовірної оцінки стійкості будівель до прогресуючого обвалення за дії пожежі та вибуху необхідне всебічне врахування даних щодо місця виникнення та масштабів поширення пожежі, параметрів вибуху, сценарію їх розвитку у часі, а також залежностей теплофізичних і механічних характеристик матеріалів конструкцій від температури нагрівання та дії імпульсних навантажень.

Особливу увагу слід приділяти вторинним ефектам пожежі та вибуху, таким як температурні деформації, теплові розширення матеріалів, перерозподіл внутрішніх зусиль, зміна схем несучої роботи, локальні руйнування та розвиток механізмів прогресуючого обвалення конструктивних елементів.

Вплив пожежі враховується шляхом використання знижених теплофізичних і механічних характеристик матеріалів (міцності, модуля деформації, густини, теплопровідності тощо) відповідно до їх залежності від температури, визначеної за стандартними або реальними пожежними сценаріями.

Також моделюються температурні деформації та теплові розширення елементів конструкції, що впливають на зміну розподілу зусиль у системі.

Вплив вибуху враховується через застосування імпульсних навантажень, що характеризуються надлишковим тиском, тривалістю імпульсу та швидкістю навантаження, згідно з нормативними документами та моделями вибухового навантаження.

Для оцінки стійкості після вибуху також враховується локальне руйнування елементів, зниження жорсткості та несучої здатності пошкоджених зон конструкцій, що може призводити до розвитку прогресуючого обвалення.

Для оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та вибуху слід розглядати найнебезпечніші об'єкти такі як найбільш навантажені несучі конструкції з найбільшими значеннями напружено-деформованого стану та інші несучі будівельні конструкції, обмежені протипожежними перешкодами в межах одного поверху.

Час впливу пожежі на конструкції, значення надлишкового тиску вибуху та поверховість, на якій він прикладається, визначаються на основі аналізу нормативних документів та проєктних сценаріїв розвитку аварійних ситуацій.

При цьому враховується:

- часова тривалість пожежі – встановлюється відповідно до типових сценаріїв розвитку пожеж згідно з вимогами стандартів або результатів моделювання;

- значення надлишкового тиску вибуху – визначається залежно від характеру і масштабу вибуху згідно з розрахунковими методиками з урахуванням типу вибухової речовини, її кількості та умов вибуху.

Усі вихідні параметри впливу повинні бути обґрунтовані:

- на основі об'єктивних даних і прогностичних сценаріїв розвитку подій;
- з урахуванням особливостей експлуатації об'єкта, його функціонального призначення та класу наслідків (відповідальності).

Для розрахунків будівель на стійкість до прогресуючого обвалення переважно використовують комп'ютерні програмні комплекси, що розроблені на основі методу скінченних елементів.

Для виконання такого різновиду розрахунків важливими є можливості програмного забезпечення щодо врахування фізичної та геометричної нелінійності, а також динамічного ефекту. Такі особливості дозволяють значно підвищити точність моделювання та адекватно відтворити поведінку конструкції в умовах аварійного навантаження.

Подібні можливості реалізовані в сучасних інженерних програмних комплексах, зокрема ЛІРА-САПР, COSMOS-M, LS-DYNA, SOFISTIK та інших, що спеціалізуються на нелінійному статичному й динамічному аналізі конструкцій.

Ключові аспекти, які враховуються під час проведення розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення, систематизовано в табл. 1.

Для проведення розрахунків використовувалася сертифікована в Україні ЛІРА-САПР, навчальна версія. Програмний комплекс в грудні 2015 року пройшов верифікації як програмний засіб для визначення параметрів напружено-деформованого стану, оцінки міцності і деформативності конструкцій та споруд, що підтверджується відповідним сертифікатом.

Наведена далі комп'ютерна модель розрахунку конструкцій на стійкість до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху стосується лише будівель із залізобетонних конструкцій.

6. Розробка комп'ютерної моделі прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху

Розрахунок стійкості до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

1. Побудова геометричної моделі монолітної залізобетонної будівлі в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

Табл. 1. Основні аспекти, які враховуються при розрахунку прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху

№ з/п	Аспект розрахунку	Особливості
1.	Температурні впливи пожежі	Зниження міцності, деформаційні властивості, теплові розширення
2.	Імпульсні навантаження вибуху	Надлишковий тиск, тривалість імпульсу, локальні руйнування
3.	Механізми прогресуючого обвалення	Температурні деформації, перерозподіл зусиль, зміна несучих схем
4.	Характеристики матеріалів при нагріванні	Міцність, модуль пружності, густина – залежність від температури
5.	Програмні комплекси для моделювання	ЛІРА-САПР, COSMOS-M, LS-DYNA, SOFISTIK
6.	Фізична та геометрична нелінійність	Необхідність врахування при раптовому руйнуванні
7.	Обґрунтування вихідних параметрів	На основі типових сценаріїв, характеристик вибуху й пожежі
8.	Вплив експлуатації та функції об'єкта	Залежить від класу наслідків та призначення будівлі

Для проведення дослідження стійкості залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху в ЛІРА-САПР було створено комп'ютерну просторову модель 6-ти поверхової виробничої будівлі, розрахункова модель якої представлена на рис. 1. Розміри в плані 33х12х33 м, конструктивна система будівлі – залізобетонний монолітний каркас, колони 500х500 мм, перекриття 220 мм, діафрагми жорсткості 300 мм, І ступінь вогнестійкості; категорії Б за вибухопожежною небезпекою.

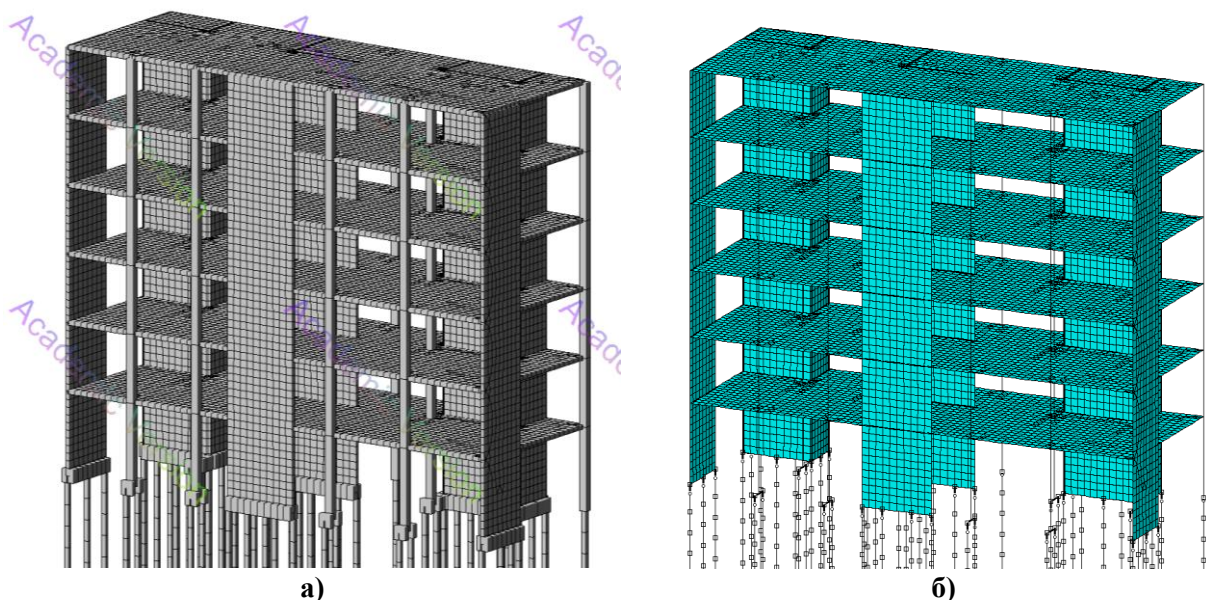


Рис. 1. Розрахункові моделі: а – просторова модель будівлі; б – скінченно-елементна модель будівлі

2. Початкові та граничні умови для розрахунку пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Після створення просторової розрахункової моделі, для кожної будівельної конструкції призначалися відповідні типи жорсткості, матеріали та відповідні

перерізи, жорсткісні характеристики з урахуванням нелінійності роботи бетону та арматури. В даній моделі прийнято 8 типів жорсткості: 1 – стіни та діафрагми жорсткості – пластина 300 мм; 2 – колона – брус 500x500 мм; 3 – плита перекриття – пластина 220 мм; 4 – паля – брус 300x300 мм.

Наступним етапом було задано відповідні нормативні навантаження на будівлю: 1 – власна вага (постійне); 2 – постійні завантаження на перекриття та покриття – 0,385 т/м²; 3 – тривалі завантаження – 0,24 т/м²; 4 – короточасні завантаження – 0,24 т/м²; 5 – вітер під кутом 0 градусів; 6 – вітер під кутом 90 градусів. Сформована таблиця розрахункових сполучень зусиль та розрахункові сполучення навантажень, для різних сценаріїв навантажень. Призначено для конструкції відповідні типи скінченних елементів: для паль в ґрунті – 57 тип, одновузловий СКЕ; для колон і паль – тип 210 – універсальний СКЕ стрижень, який враховує фізичну нелінійність; для стін і перекриття тип 242 – трикутний СКЕ (оболонка), який враховує фізичну нелінійність; додатковий тип 244 – чотирикутний СКЕ (оболонка), який враховує фізичну нелінійність. Так як розрахунок будівлі проводився в постановці як система «земля–фундамент–будівля», призначався додатковий скінченний елемент для паль в ґрунті. Призначені відповідні нелінійні закони деформування матеріалів бетону та армуючого матеріалу.

ЛІРА–САПР всім елементам схеми попередньо автоматично створює армування по пружній схемі роботи залізобетонну, армування, проте слід обов'язково відкоригувати з урахуванням запасу міцності. Після задання необхідних параметрів, проведено розрахунок моделі для перевірки деформованого стану моделі на адекватність роботи та перевірку на допустиме переміщення по осях. При перевищенні значень відносних переміщень, необхідно відкоригувати схеми і зробити відповідний перерахунок та аналіз.

Перевірено будівельні конструкції з урахуванням меж вогнестійкості. Для цього у налаштуванні характеристик матеріалу виставлено критерій «враховувати вогнестійкість» та задано для кожної конструкції: температурний режим; необхідний клас вогнестійкості; характеристики матеріалу.

Прийнято сценарій умовної пожежі, що розвивається за стандартним температурним режимом, теплового впливу пожежі зазнають всі будівельні конструкції, які обмежені протипожежними перешкодами. Задання пожежі здійснювалося через задання знижених характеристик міцності та деформативності матеріалів залежно від розподілу температури нагрівання для виділених червоним конструкцій, які зображені на рис. 2.

Для відповідного інтервалу тривалості пожежі, у зв'язку із нерівномірним розподілом температури, кожному шару матеріалу на підставі значень усередненої температури, задавалися відповідні знижені характеристики матеріалів для цих температур згідно EN 1992–1–2.

Розрахунок на тепловий вплив пожежі виконують відповідно до визначеного сценарію з припущенням роботи матеріалів за нелінійними законами деформування на відповідний час теплового впливу пожежі становила 60 хв – як для перекриття. Для визначення розподілу температурних полів використовувався окремий модуль ЛІРА–САПР «теплопровідність» (рис. 3). Результати розрахунку температурних полів співпадають з проведеними натурними випробуваннями конструкцій.

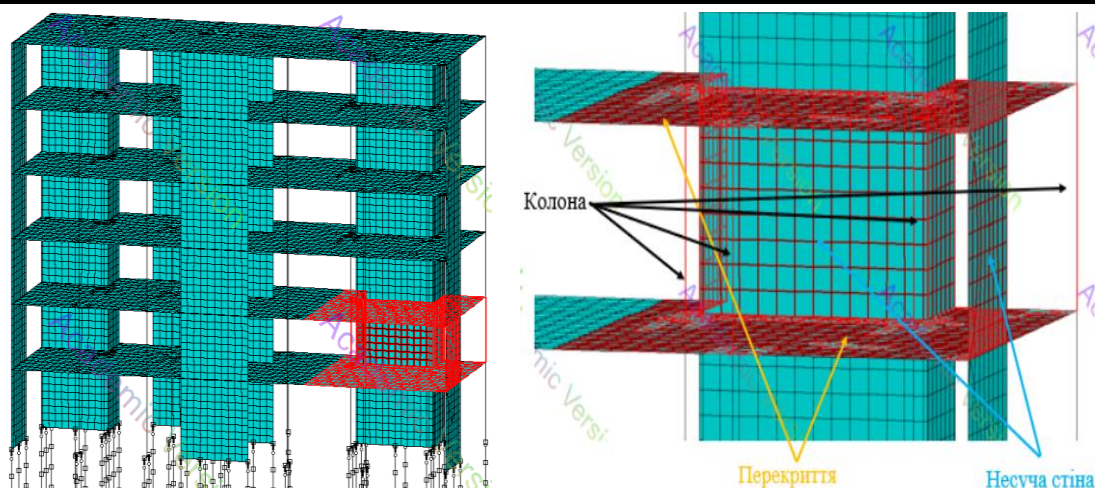


Рис. 2. Область пожежі в скінченно-елементній моделі будівлі

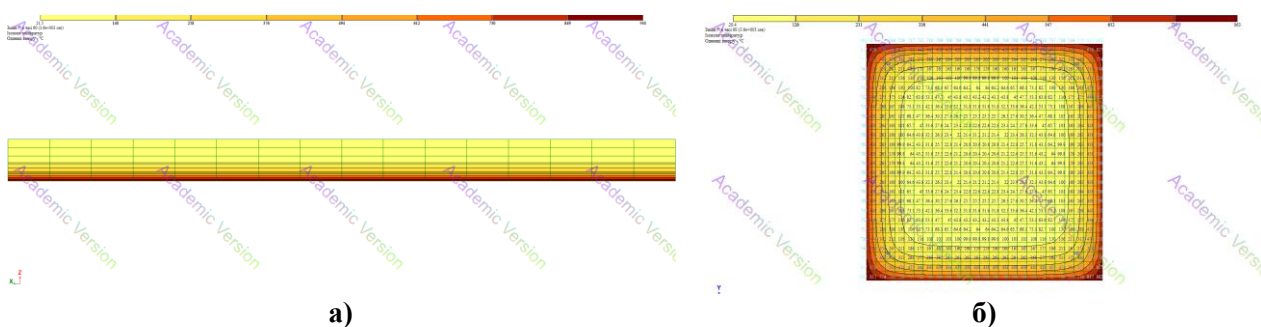


Рис. 3. Розподіл температурних полів у залізобетонних конструкціях: а – перекрыття; б – колона

В даному розрахунку прийняті наступні параметри: стандартно-температурний режим; обігрів центральних колон з усіх сторін, кутових колон з двох сторін, центральних колон з трьох сторін; обігрів перекрыття 1-го поверху зверху, перекрыття 2-го поверху знизу; обігрів несучих стін з боку пожежі. При вивченні питання навантаження від пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху було встановлено, якщо що із заданням навантаження від пожежі питань не виникає, то із внутрішнім вибуху питання дещо складніше. По перше, велика кількість робіт та положення документів присвячено дослідженню питання вивченню зовнішніх вибухів для бризантних речовин, таких як тротил, тринітротолуол.

На рис. 4 представлено графічні залежності зміни тиску вибухової хвилі від часу. Графік (а) ілюструє характерну зміну тиску під час зовнішнього вибуху бризантних речовин відповідно до AISC Steel Design Guide 26. Графіки (б) демонструють часову залежність тиску при дефлаграційних внутрішніх вибухах, отриманих на основі результатів натурних випробувань [16].

Вибухи бризантних речовин характеризуються різким імпульсним підвищенням тиску до пікового значення з наступною швидкою декомпресією. Такі процеси супроводжуються наявністю двох фах: позитивної фази надлишкового тиску та негативної фази розрідження, що є типовим для детонаційного характеру вибуху.

На відміну від вибухових матеріалів інші газоподібні вибухові матеріали демонструватимуть зміну свого вихідного тиску вибуху. Вибух цих матеріалів часто неповний, і лише частина загальної маси вибухової речовини бере участь у процесі детонації, про що свідчить відносно пологий графік підвищення тиску на відмінно від вибухів бризантних речовин.

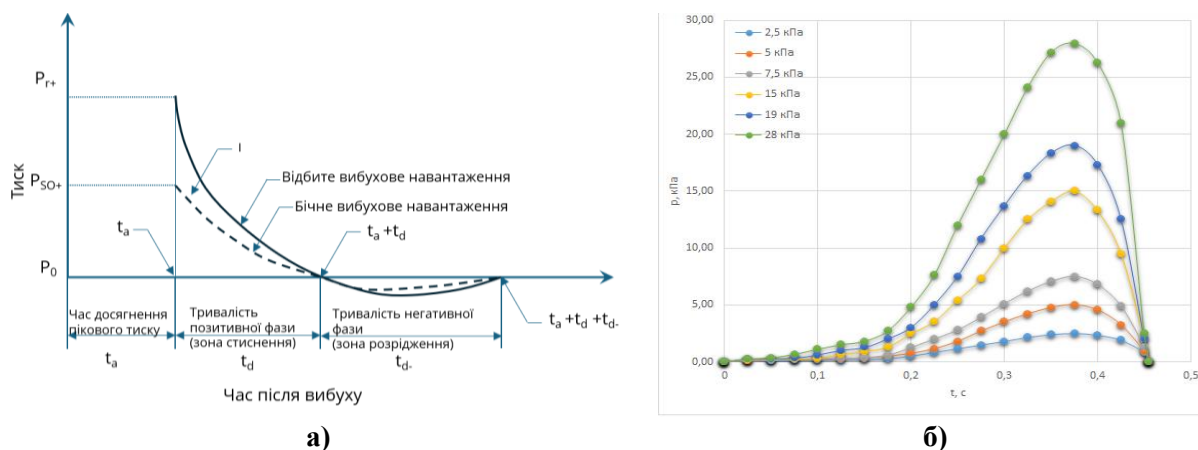


Рис. 4. Залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі: а – для зовнішніх вибухів бризантних речовин за AISC Steel Design Guide 26, б – для внутрішніх вибухів парогазоповітряних сумішей за ДСТУ 9176:2022

Умовно прийнято, що вибух виникає на 60-й хвилині після початку пожежі. Причини виникнення пожежі та вибуху на цьому етапі дослідження окремо не аналізувалися, оскільки основною метою є оцінка впливу комбінованого навантаження на несучу здатність конструкцій.

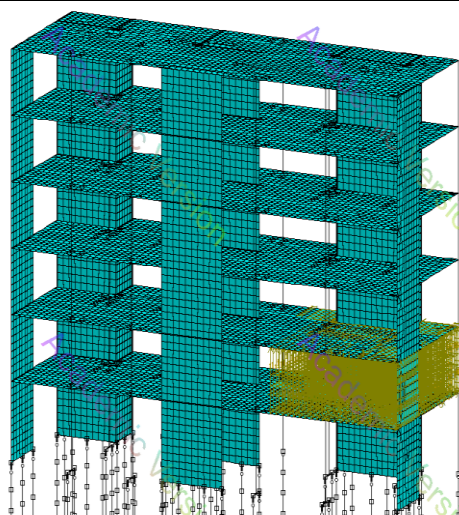
Для спрощеного розрахунку динамічного навантаження, викликаного вибухом, було використано припущення згідно з положеннями додатка D [17], динамічне навантаження від вибуху розподіляється рівномірно на всі конструктивні елементи будівлі. Це припущення дозволяє уникнути необхідності складного моделювання розповсюдження ударної хвилі в об'ємі приміщення та спростити розрахунок.

Надлишковий тиск від вибуху та його пікові значення визначалися відповідно до вимог [18], який встановлює методику розрахунку вибуху. При цьому залежності величини тиску від типу вибухонебезпечного газу або пари, їх відсоткового вмісту в повітрі, кількості й розмірів отворів, наявності або відсутності легкоскридних конструкцій в даному розрахунку не враховувалися. Вказані фактори є важливими для точного прогнозування параметрів вибуху, однак їх облік виходить за межі задачі на даному етапі дослідження.

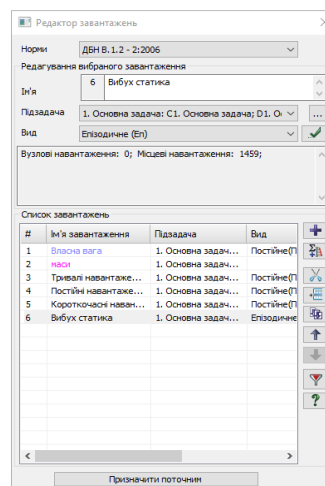
За результатами розрахунків прийнято максимальне значення надлишкового тиску вибуху на рівні 15 кПа, що відповідає типовим параметрам можливих внутрішніх вибухів побутових газоповітряних сумішей у закритих приміщеннях середніх розмірів.

На рис. 5 наведено механізм задання та перетворення в розрахунковій моделі статичного навантаження, отриманого для розрахункового надлишкового тиску вибуху, до еквівалентного динамічного навантаження з урахуванням значень часової залежності наведених попередньо на рис. 4б.

У результаті комп'ютерного моделювання було отримано розподіл напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій у межах трьох розрахункових сценаріїв. Перший сценарій відображає стан конструкцій за відсутністю аварійних ситуацій, що дозволяє визначити початковий розподіл зусиль (рис. 6). Другий – моделює умови безпосередньо під час стандартної пожежі протягом тривалістю 60 хв, з урахуванням зміни фізико-механічних властивостей матеріалів в залежності від температурного впливу (рис. 7).

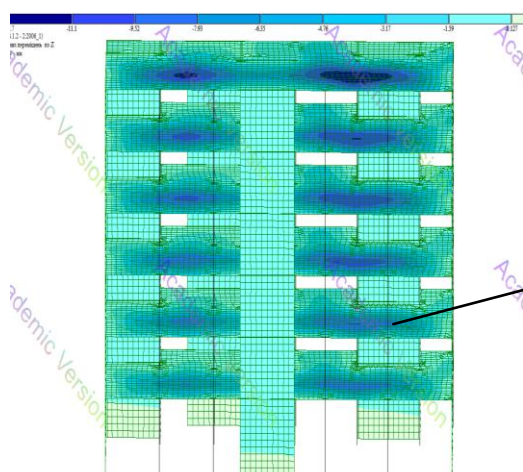


а)

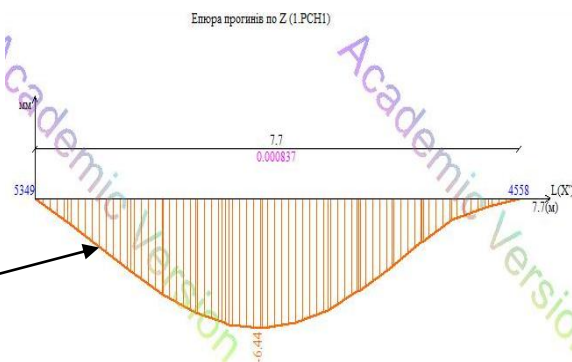


б)

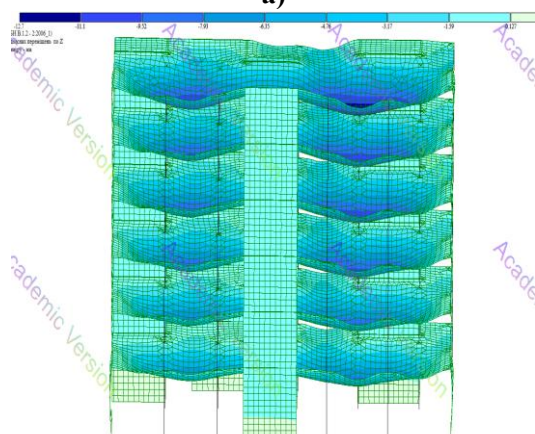
Рис. 5. Задання та перетворення в розрахунковій моделі вибухового навантаження: а – жовтим кольором виділена область вибухового навантаження в скінченно-елементній моделі будівлі, б – редактор завантажень, редагування завантажень



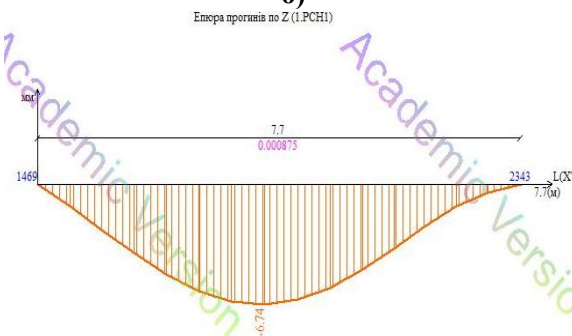
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Напружено-деформований стан конструкцій та переміщення до аварійних ситуацій: а – ізополя відносних переміщень по Z; б – епюра прогинів верхньої плити перекриття (6,44 мм); в – ізополя переміщень по Z збільшені у 20 разів; г – епюра прогинів нижньої плити перекриття (6,74 мм)

Третій сценарій охоплює комбіновану дію стандартної пожежі протягом тривалістю 60 хв та внутрішнього вибухового навантаження з надлишковим

тиском 15 кПа, що дозволяє оцінити граничну стійкість конструкцій та можливість розвитку прогресуючого обвалення в умовах найскладнішого впливу (рис. 8).

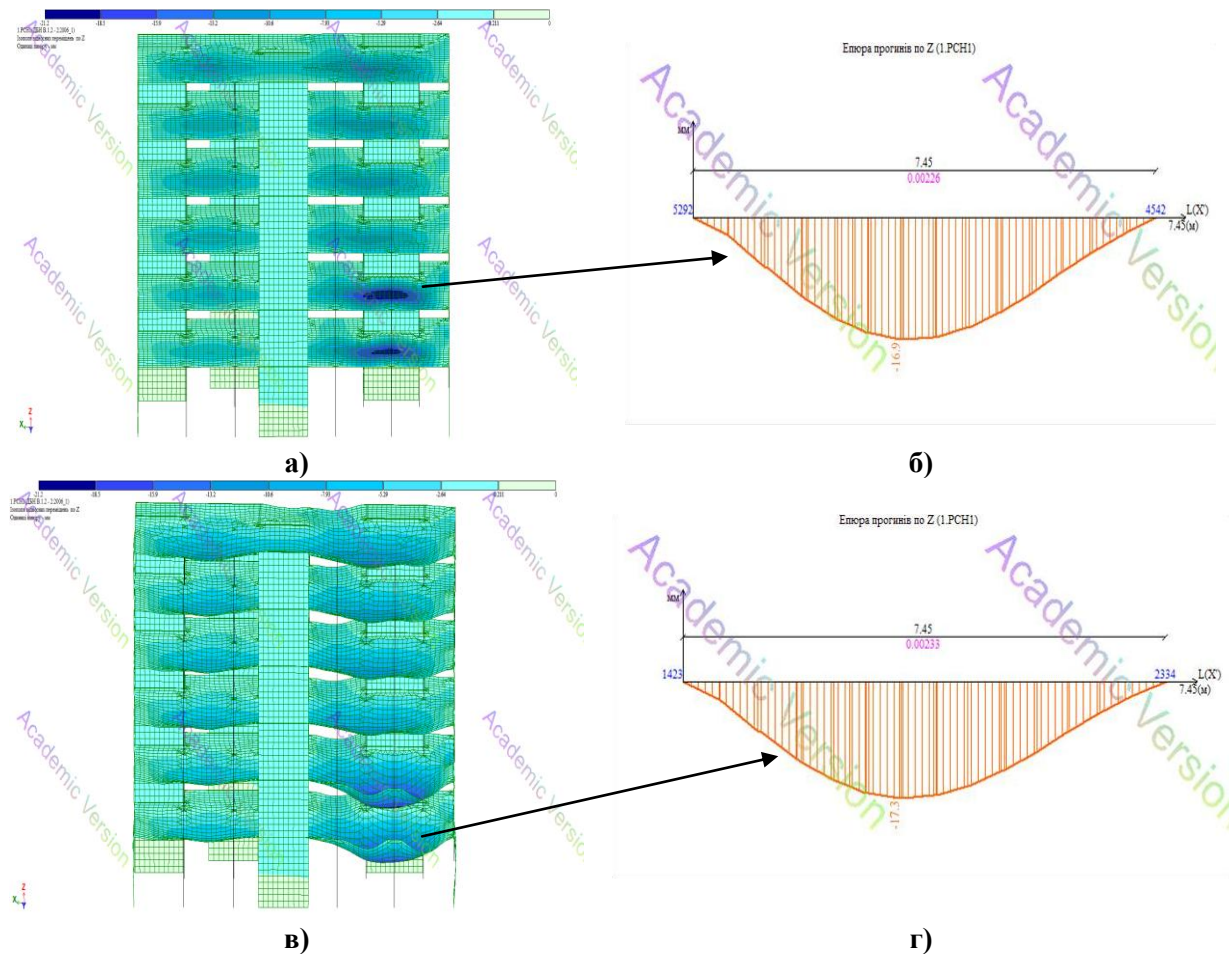


Рис. 7. Напружено-деформований стан конструкцій та переміщення при пожежі тривалістю 60 хв.: а – ізополі відносних переміщень по Z; б – епюра прогинів верхньої плити перекриття (16,9 мм); в – ізополі переміщень по Z збільшені у 20 разів; г – епюра прогинів нижньої плити перекриття (17,3 мм)

Узагальнені кількісні результати зміни переміщень (прогинів) верхньої та нижньої плит перекриття монолітної залізобетонної будівлі, отримані за результатами чисельного моделювання трьох сценаріїв аварійного навантаження – за нормальних умов експлуатації, під час дії пожежі, а також при комбінованому впливі пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху – систематизовані в табл. 2.

Табл. 2. Значення переміщень конструкцій при різних аварійних ситуаціях

Плита	Переміщення (прогин) конструкції, мм			
	Нормальні умови експлуатації	Пожежа 60 хв	Вибух 15 кПа	Пожежа 60 хв та вибух 15 кПа
Верхня	6,44	16,9 (збільшення у 2,6 рази)	–5,35	–14,4
Нижня	6,74	17,3 (збільшення у 2,6 рази)	33,4 (збільшення у 5,2 рази)	55,8 (збільшення у 8,3 рази)

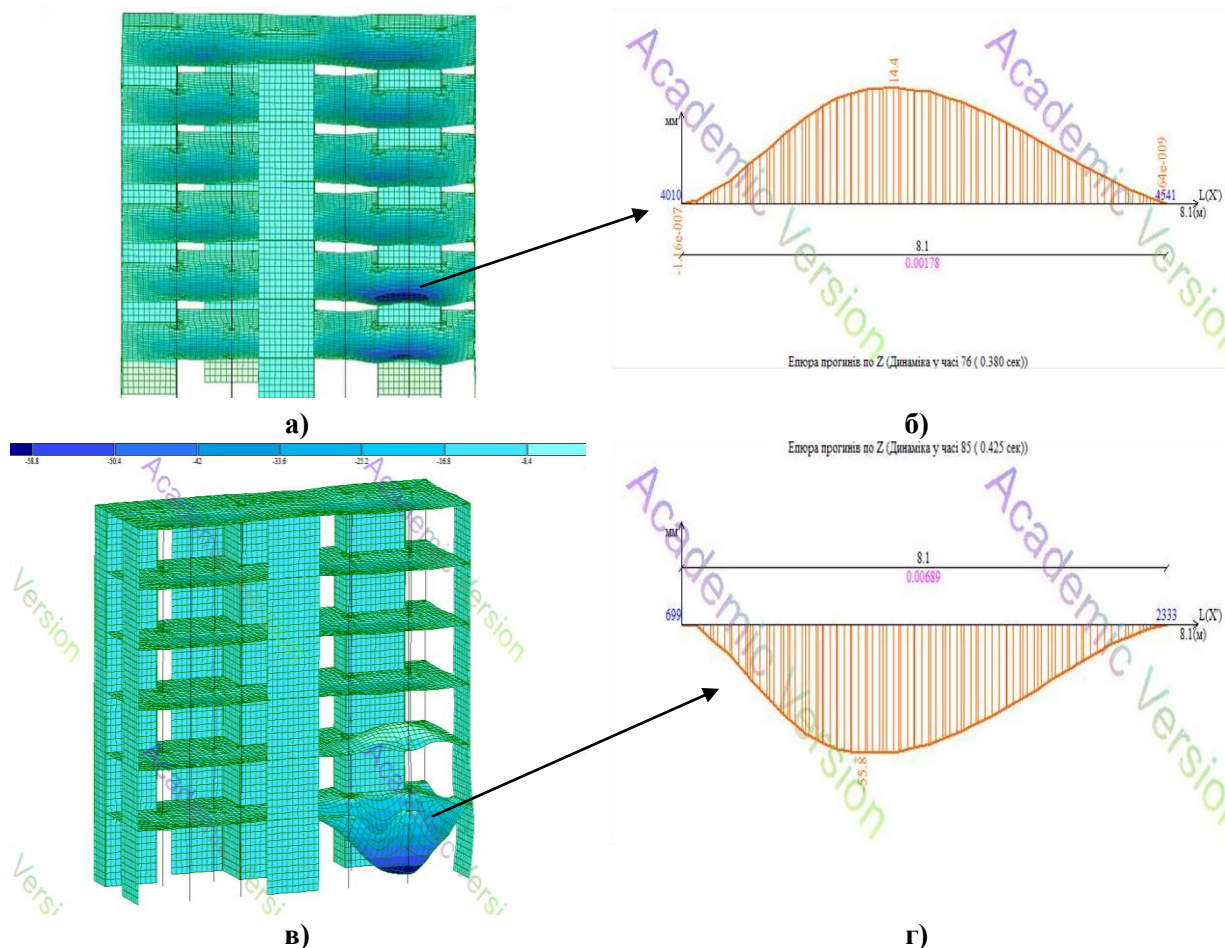


Рис. 8. Напружено-деформований стан конструкцій та переміщення при пожежі тривалістю 60 хв та внутрішньому дефлаграційному вибуху 15 кПа: а – ізополя відносних переміщень по Z; б – епо́ра проги́нів верхньої плити перекриття (14,4 мм); в – ізополя переміщень по Z збільшені у 20 разів; г – епо́ра проги́нів нижньої плити перекриття (55,8 мм)

Додаткове вибухове навантаження на конструкції при дії пожежі призводять до значних деформацій та переміщень, що збільшує передумови можливості прогресуючого обвалення будівлі при комбінованій дії пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

7. Обговорення результатів програмної реалізації оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення

Результати комп'ютерного моделювання підтверджують суттєвий вплив як теплового, так і динамічного (вибухового) навантаження на напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій будівлі. Одночасне прикладання цих навантажень призводить до значного зростання деформацій перекриття в порівняно зі звичайним експлуатаційним станом. Ключовими механізмами такого ефекту є зменшення міцнісних характеристик конструкцій при нагріванні, додаткове динамічне навантаження і перерозподіл внутрішніх зусиль у системі будівлі внаслідок вибуху, зміна схеми роботи конструктивних елементів (рис. 1–5).

Визначені в ході комп'ютерного моделювання напружено-деформовані стани конструкцій до настання аварійної ситуації свідчать про прийнятність граничних значень переміщень у нормальних умовах. Зокрема, максимальні вертикальні прогини нижньої та верхньої монолітної залізобетонної плити перекриття в зонах найбільшого деформування становили в середньому 6,5 мм, що відповідає вста-

новленим нормативним значенням експлуатаційної придатності (рис. 6).

Під впливом температурного навантаження за стандартним температурним режимом пожежі тривалістю 60 хв, відбувається суттєве збільшення деформацій конструктивних елементів. Зокрема, результати моделювання свідчать про збільшення вертикальних прогинів як нижньої, так і верхньої плит перекриття в 2,6 рази порівняно з початковим (експлуатаційним) станом. Максимальні значення прогинів сягнули 16,9 мм, що наведено у відповідному розрахунковому сценарії (рис. 7). Такий характер змін свідчить про втрату жорсткості залізобетонних елементів унаслідок зміни властивостей матеріалу при дії високих температур. Зокрема, при підвищенні температури до 500–600 °C відбувається зменшення міцності бетону, втрата зчеплення між бетоном і арматурою, а також зниження пружних характеристик сталі та бетону. Всі ці фактори призводять до значного збільшення деформацій конструктивних елементів навіть без зміни прикладеного навантаження.

У разі комбінованого впливу стандартного температурного режиму пожежі тривалістю 60 хв та внутрішнього дефлаграційного вибуху з надлишковим тиском 15 кПа спостерігається істотне збільшення напружено-деформованого стану конструкцій. Зокрема, відзначено різке зростання величин переміщень і прогинів нижньої плити перекриття – до значень, що перевищують початкові в 8,2 рази порівняно з нормальними умовами експлуатації. Верхня плита перекриття під впливом вибухового навантаження зазнала зворотного переміщення: від максимального прогину вниз (16,9 мм) до підйому вгору на 14,4 мм, що свідчить про складний просторовий характер взаємодії конструктивних елементів при вибуху (рис. 8).

Аналіз значень, наведених у табл. 2, демонструє, що поєднана дія температурного та вибухового навантажень має суттєвий вплив на несучу здатність конструкцій, що слід враховувати при проєктуванні та оцінці їхньої несучої здатності в умовах потенційних аварій.

Особливістю розробленої за методикою комп'ютерної моделі є інтеграція в модель впливів пожежі та внутрішнього вибуху з урахуванням часової послідовності їх дії, геометричної та фізичної нелінійності конструкцій, просторової взаємодії елементів, а також температурної деградації матеріалів. На відміну від більшості попередніх досліджень, де аналіз проводиться або ізольовано для вибуху, або для пожежі, у цьому дослідженні враховано їх комбінацію – що є характерною ситуацією для реальних аварійних сценаріїв.

До обмежень комп'ютерної моделі слід віднести спрощення щодо геометрії реального середовища вибуху: не враховано форму приміщення, наявність та розташування легкоскридних конструкцій, характер розповсюдження хвилі. Вибух задавався як рівномірно розподілене навантаження, без просторової диференціації тиску, що відтворює більш жорсткі умови для проведення розрахунків.

Отримані дані підтверджують гіпотезу, що саме комбінація аварійних навантажень чинить найбільш небезпечний вплив на будівлі, а не ізольована дія одного з чинників. На відміну від класичних підходів, що базуються на ідеалізації місцевого руйнування окремого конструктивного елемента, розроблена комп'ютерна модель у середовищі ЛПРА–САПР дозволяє врахувати динаміку розвитку деформацій в часі та просторову взаємодію елементів конструктивної системи при комбінації аварійних ситуацій (пожежа, вибух).

До недоліків слід віднести спрощений підхід до завдання параметрів вибухового навантаження – фактична хімічна природа суміші, її концентрація, розташування джерела вибуху в моделі не враховувались. Також доцільним є врахування змін жорсткості з'єднань між конструктивними елементами в динаміці, включення контактної взаємодії та можливості утворення тріщин.

Подальший розвиток дослідження може охоплювати поєднання моделювання з натурними експериментами, включення в модель додаткових сценаріїв (наприклад, зовнішній вибух, вторинна пожежа, руйнування кількох поверхів). Основними труднощами стануть даного дослідження є проведення експериментальних випробувань яке полягає у складності відтворення реальних комбінацій навантажень у лабораторних умовах.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що застосування комплексної комп'ютерної моделі з можливістю урахування часової залежності температурного впливу, динамічного імпульсного навантаження, зміни фізико-механічних властивостей матеріалів і геометричної нелінійності дозволяє більш точно оцінити граничні стани конструкцій, запропоновувати обґрунтовані заходи для стійкості будівель до прогресуючого обвалення.

8. Висновки

1. Визначені особливості розрахунку для визначення стійкості монолітних залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок дії пожежі та внутрішнього вибуху. Для достовірного розрахунку необхідне комплексне врахування температурних та динамічних впливів, просторової взаємодії конструктивних елементів, зниження фізико-механічних характеристик матеріалів залежно від температури, а також ефектів перерозподілу внутрішніх зусиль. Обґрунтовано доцільність використання квазістатичної та динамічної постановки задачі з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності системи. Підкреслено необхідність використання нормативних сценаріїв розвитку аварій з урахуванням характеру навантаження, часу впливу та конструктивних особливостей будівлі. Запропонований підхід об'єднує температурне та вибухове навантаження в єдину модель, забезпечує точність прогнозування граничного стану конструкцій та визначення найбільш небезпечних зон в будівлі при комбінації аварійних ситуацій.

2. Розроблена комп'ютерна модель у програмному комплексі ЛІРА-САПР для моделювання прогресуючого обвалення з урахуванням силових, високотемпературних впливів і тиску вибуху. Побудована просторова фізично та геометрично нелінійна комп'ютерна модель шестиповерхової монолітної залізобетонної будівлі в програмному середовищі ЛІРА-САПР. Модель охоплює повний цикл аварійного навантаження, включаючи режим стандартної пожежі тривалістю 60 хвилин, розрахунок температурних полів за допомогою модуля «теплопровідність», а також моделювання імпульсного вибухового навантаження з надлишковим тиском 15 кПа через налаштування «динаміка в часі». Здійснено призначення типів скінченних елементів, нелінійних характеристик матеріалів, сценаріїв пожежі та вибуху, а також їх часову послідовність. Результати моделювання дозволили зафіксувати значення деформаційних параметрів конструкцій за умов комбінованої дії аварійних впливів, що дозволяє прогнозування можливість руйнування конструкцій. Розроблена модель дозволяє здійснювати аналіз загальної стійкості конструктивної системи монолітних залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та вибуху.

Література

1. Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Ромін А. В. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення. *Механіка та математичні методи*. 2023. Вип. 2. С. 25–40. doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40
2. Skob Y., Dreval Y., Vasilchenko A., Maiboroda R. Selection of material and thickness of the protective wall in the conditions of a hydrogen explosion of various power. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 952. P. 121–129. doi: 10.4028/p-ST1VeT
3. Maiboroda R., Zhuravskij M., Otrosh Y., Karpuntsov V. Determination of the required area of easily removable structures to protect against progressive collapse. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1004. P. 73–83. doi: 10.4028/p-V0xA6H
4. Tanapornraweekit G., Haritos N., Mendis P. Behavior of FRP–RC plates under multiple independent air blasts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2011. Vol. 25. № 5. P. 433–440. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000191
5. Liu Y., Yan J., Huang F. Behavior of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14. № 5. P. 550–559. doi: 10.1016/j.dt.2018.07.026
6. ДСТУ–Н Б EN 1991–1–7:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи. Чинний від 01.07.2013 р. Вид. офіц. Київ: Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво», 2010. 81 с.
7. ДСТУ–Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій. Чинний від 01.07.2009 р. Вид. офіц. Київ: Технічний комітет з стандартизації «Арматура для залізобетонних конструкцій», 2009. 105 с.
8. Shan S., Wang H., Li S., Wang B. Evaluation of progressive collapse resistances of RC frame with contributions of beam, slab and infill wall. *Structures*. 2023. Vol. 53. P. 1463–1475. doi: 10.1016/j.istruc.2023.04.114
9. Білошицька Н., Білошицький М., Татарченко З., Дячук Б. Математичне моделювання роботи будівельних конструкцій в складних умовах хімічного виробництва. *Містобудування та територіальне планування*. 2022. Вип. 81. С. 59–69. doi: 10.32347/2076-815x.2022.81.59-69
10. Almusallam T., Elsanadedy H., Abbas H., Alsayed S., Al-Salloum Y. Progressive collapse analysis of a RC building subjected to blast loads. *Structural Engineering and Mechanics*. 2010. Vol. 36. № 3. P. 301–319. doi: <https://doi.org/10.12989/SEM.2010.36.3.301>
11. Ding Y., Chen Y., Shi Y. Progressive collapse analysis of a steel frame subjected to confined explosion and post-explosion fire. *Advances in Structural Engineering*. 2016. Vol. 19, № 11. P. 1780–1796. doi:10.1177/1369433216649381
12. Jahromi H., Izzuddin B., Nethercot D. Robustness assessment of building structures under explosion. *Buildings*. 2012. Vol. 2. № 4. P. 497–518. doi: 10.3390/buildings2040497
13. Luccioni B., Ambrosini R., Danesi R. Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26. № 1. P. 63–71. doi: 10.1016/j.engstruct.2003.08.011
14. Майборода Р. І., Отрош Ю. А. Дослідження методики розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху. *Комунальне господарство міст: наук.–техн. зб. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2023. Т. 3. Вип. 191. С. 115–127. doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40
15. ДСТУ 9294:2024. Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення. Чинний від 01.03.2025 р. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації «Захист будівель та споруд», Державне підприємство

«Державний науково–дослідний інститут будівельних конструкцій», 2025. 70 с.

16. ДСТУ 9176:2022. Пожежна безпека. Методи визначення параметрів легкоскопних конструкцій для приміщень та будинків. Основні положення. Чинний від 01.10.2023 р. Вид. офіц. Київ: Технічний комітет стандартизації «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2023. 23 с.

17. ДСТУ–Н Б EN 1991–1–7:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи. Чинний від 01.07.2013 р. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво», 2013. 100 с.

18. ДСТУ Б В.1.1–36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Чинний від 01.01.2017 р. Вид. офіц. Київ : УкрНДІЦЗ, 2017. 34 с.

R. Maiboroda, Senior Lecturer of the Department
Yu. Otrosh, DSc, Professor, Head of the Department
 National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF ASSESSMENT OF BUILDINGS' RESISTANCE TO PROGRESSIVE COLLAPSE

A computer model has been developed that allows assessing the resistance of a reinforced concrete monolithic building to progressive collapse under the influence of the combined action of fire and internal deflagration explosion. For this purpose, a spatial physically and geometrically nonlinear model of a six-story industrial building was created. The model takes into account the combined operation of load-bearing structures, changes in the thermophysical and mechanical properties of materials under the influence of elevated temperatures, the formation of local destruction, redistribution of internal forces and dynamic effects from explosive loading. The model is implemented in the LIRA-SAPR software package using the “thermal conductivity” module to take into account the temperature effect of a standard fire regime lasting 60 minutes and the “dynamics in time” settings to simulate an impulse load from an explosion of 15 kPa. As a result of the modeling, it was established that the isolated action of a fire leads to an increase in the deflections of the floor slabs by 2.6 times, and an internal explosion leads to an increase in the deflection of the bottom slab by 5.2 times relative to the normal state. The greatest danger is the scenario of the combined impact of fire and explosion, in which the deflection of the lower plate reached 55.8 mm, which exceeds the initial value by 8.3 times. Such deformations, when combined, can potentially cause the loss of the load-bearing capacity of structures and the development of progressive collapse of the building. The results obtained form the basis for increasing the level of structural safety of buildings and reducing the risk of loss of human lives in emergency situations. The proposed approach provides the possibility of a comprehensive assessment of the resistance of reinforced concrete monolithic buildings to progressive collapse under the combined action of thermal and explosive loads, as well as the justification and implementation of effective measures to increase their reliability and survivability.

Keywords: progressive collapse, fire, explosion, LIRA–SAPR, computer model, load combination

References

1. Otrosh, Yu., Maiboroda, R., Romin, A. (2023). Doslidzhennia metodyk rozrakhunku prohresuiuchoho obvalennia. Mekhanika ta matematychni metody, 2, 25–40. doi: 10.31650/2618–0650–2023–5–2–25–40
2. Skob, Y., Dreval, Y., Vasilchenko, A., Maiboroda, R. (2023). Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. Key Engineering Materials, 952, 121–129. doi: 10.4028/p–ST1VeT
3. Maiboroda, R., Zhuravskij, M., Otrosh, Yu., Karpuntsov, V. (2024). Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect Against Progressive Collapse. Key Engineering Materials, 1004, 73–83. doi: 10.4028/p–V0xA6H
4. Tanapornraweekit, G., Haritos, N., Mendis, P. (2011). Behavior of FRP–RC plates under multiple independent air blasts. Journal of Performance of Constructed Fa-

cilities, 25(2), 433–440. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000191

5. Liu, Y., Yan, J., Huang, F. (2018). Behavior of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defense Technology*, 14(5), 550–559. doi: 10.1016/j.dt.2018.07.026

6. DSTU–N B EN 1991–1–7:2010. Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1–7. Zahalni dii. Osoblyvi dynamichni vplyvy. Chynnyi vid 01.07.2013 r. Vyd. ofits. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Metalobudivnytstvo», 81

7. DSTU–N B EN 1990:2008. Yevrokod. Osnovy proiektuvannia konstruktsii. Chynnyi vid 01.07.2009 r. Vyd. ofits. Kyiv : Tekhnichniy komitet z standartyzatsii «Armatura dlia zalizobetonnykh konstruktsii», 105.

8. Shan, S., Wang, H., Li, S., Wang, B. (2023). Evaluation of progressive collapse resistances of RC frame with contributions of beam, slab and infill wall. *Structures*, 53, 1463–1475. doi: 10.1016/j.istruc.2023.04.114

9. Biloshitska, N., Biloshitsky, M., Tatarchenko, Z., Dyachuk, B. (2022). Mathematical modeling of building structures in complex conditions of chemical production. *Urban planning and territorial planning*, 81, 59–69. doi: 10.32347/2076-815x.2022.81.59-69

10. Almusallam, T., Elsanadedy, H., Abbas, H., Alsayed, S., Al-Salloum, Y. (2010). Progressive collapse analysis of a RC building subjected to blast loads. *Structural Engineering and Mechanics*, 36(3), 301–319. doi: 10.12989/SEM.2010.36.3.301

11. Ding, Y., Chen, Y., Shi, Y. (2016). Progressive collapse analysis of a steel frame subjected to confined explosion and post-explosion fire. *Advances in Structural Engineering*, 19(11), 1780–1796. doi:10.1177/1369433216649381

12. Jahromi, H., Izzuddin, B., Nethercot D. (2012). Robustness assessment of building structures under explosion. *Buildings*, 2(4), 497–518. doi: 10.3390/buildings2040497

13. Luccioni, B., Ambrosini, R., Danesi, R. (2004). Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*, 26(1), 63–71. doi: 10.1016/j.engstruct.2003.08.011

14. Maiboroda, R., Otrosh, Yu. (2023). Doslidzhennia metodyky rozrakhunku stiikosti do prohresuiuchoho obvalennia budivel vnaslidok pozhezhi ta vybukhu. *Komunalne hospodarstvo mist: nauk.–tekhn. zb. Seriia: Tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 3(191), 115–127. doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40

15. DSTU 9294:2024. Rozrakhunok budivel na stiikist do prohresuiuchoho (neproportsiinoho) obvalennia. Chynnyi vid 01.03.2025 r. Vyd. ofits. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Zakhyst budivel ta sporud», Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovy–doslidnyi instytut budivelnnykh konstruktsii», 70.

16. DSTU 9176:2022. Pozhezhna bezpeka. Metody vyznachennia parametriv lehkoskydnykh konstruktsii dlia prymishchen ta budynkiv. Osnovni polozhennia. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Pozhezhna bezpeka ta protypozhezhna tekhnika», 23.

17. DSTU–N B EN 1991–1–7:2010. Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1–7. Zahalni dii. Osoblyvi dynamichni vplyvy. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Metalobudivnytstvo», 100.

18. DSTU B V.1.1–36:2016. Vyznachennia katehorii prymishchen, budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu. Kyiv : UkrNDITsZ, 34.

Надійшла до редколегії: 22.02.2025

Прийнята до друку: 19.04.2025