

УДК 614.841

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ВПЛИВОМ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Пурденко Р. Р.¹, Отрош Ю. А.¹, Рашкевич Н. В.¹

¹Національний університет цивільного захисту України

Анотація: У статті наведено результати комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану одноповерхової виробничої будівлі зі сталевим каркасом під дією вибухової ударної хвилі. Об'єктом дослідження є будівля розмірами 60×15 м з висотою 12 м, просторову жорсткість якої забезпечують сталеві колони, ферми покриття та система зв'язків. Розглянуто аварійну ситуацію, зумовлену вибухом тринітротолуолу масою 60 т на відстані 500 м від будівлі. Параметри вибухової ударної хвилі визначено за емпіричними залежностями через наведену відстань, при цьому надмірний тиск на фронті хвилі склав 9,83 МПа.

Розрахунок виконано методом комп'ютерного моделювання з урахуванням постійних, кліматичних та особливих навантажень. Вибуховий вплив змодельовано у вигляді статичної та динамічної складових, що дало змогу врахувати інерційні ефекти та вимушені коливання конструкції. Формування розрахункових поєднань здійснено за принципом найбільш несприятливих комбінацій навантажень з подальшою перевіркою елементів за I граничним станом.

За результатами розрахунку встановлено, що найбільші осеві зусилля та згинальні моменти зосереджуються в колонах сталевого каркасу; максимальний згинальний момент у колоні становить 17,4 т·м. Ферми покриття, опорні розкоси та елементи решітки працюють переважно на стиск і розтяг без істотної участі згину. Максимальні переміщення конструкції досягли 41,8 мм уздовж поздовжньої осі та 12,2 мм у вертикальному напрямку. Перевірка за I групою граничних станів показала, що колони не забезпечують нормативну міцність, тоді як інші елементи конструкції відповідають вимогам. Отримані результати дозволяють локалізувати слабкі елементи будівлі та обґрунтувати необхідність їх посилення для підвищення стійкості виробничих об'єктів до вибухових впливів в умовах воєнного стану.

Ключові слова: вибухова ударна хвиля, комп'ютерне моделювання, сталевий каркас, динамічне навантаження, ЛІРА-САПР.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF BUILDING STRUCTURES UNDER THE EFFECT OF EXPLOSIVE LOADS

R. Purdenko¹, Yu. Otrosh¹, N. Rashkevich¹

¹National University of Civil Defence of Ukraine

Abstract. The article presents the results of computer modeling of the stress–strain state of a single-storey industrial building with a steel frame subjected to a blast shock wave. The object of the study is a building measuring 60 × 15 m with a ridge height of 12 m, whose spatial stiffness is provided by steel columns, roof trusses, and a system of bracings. An emergency scenario caused by the detonation of 60 t of trinitrotoluene at a distance of 500 m from the building is considered. The parameters of the blast shock wave were determined using empirical relationships based on the scaled distance; the peak overpressure at the shock front reached 9.83 MPa.

The analysis was carried out using computer modeling with consideration of permanent, climatic, and accidental loads. The blast action was modeled by static and dynamic components, which made it possible to account for inertial effects and forced vibrations of the structure. Load combinations were formed according to the principle of the most unfavorable combinations, followed by verification of structural elements for the ultimate limit state of the first group.

The calculation results show that the highest axial forces and bending moments are concentrated in the steel frame columns; the maximum bending moment in a column is 17.4 t·m. Roof trusses,



support braces, and lattice members operate mainly in compression and tension, with no significant bending contribution. The maximum structural displacements reached 41.8 mm along the longitudinal axis and 12.2 mm in the vertical direction. Verification according to the first group of limit states indicated that the columns do not meet the required strength criteria, while the remaining structural elements satisfy the normative requirements. The obtained results make it possible to identify the most vulnerable elements of the building and substantiate the need for their strengthening in order to increase the resistance of industrial facilities to blast effects under martial law conditions.

Keywords: explosive shock wave, computer modeling, steel frame, dynamic load.

1 ВСТУП

За останні роки на території України зафіксовано низку випадків пошкодження та руйнування будівельних конструкцій, що супроводжувалися порушенням їхньої несучої здатності та цілісності окремих елементів або конструктивних систем загалом. Аналіз таких подій свідчить, що значна частина пошкоджень пов'язана з дією інтенсивних короточасних навантажень, характерних для вибухових впливів різного походження. В умовах воєнного стану частота та масштаб таких навантажень зростають, а спектр джерел вибухових впливів розширюється, що потребує оцінки працездатності будівельних конструкцій з урахуванням особливостей напружено-деформованого стану, фізико-механічних властивостей матеріалів, конструктивних схем будівель, а також технічного стану конструкцій на момент виникнення аварійного впливу.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження безпеки та надійності будівельних конструкцій в умовах динамічних навантажень, зосереджені на оцінці поведінки матеріалів та конструкцій під час вибухових та ударних впливів.

У роботі [1] розглянуто математичні моделі конструкційних матеріалів, що описують їхню динамічну поведінку під дією вибухових навантажень з урахуванням фізико-механічних властивостей бетону та армування. Запропоновано спрощений підхід із використанням коефіцієнтів динамічного зміцнення та детальний підхід, реалізований на основі рівнянь газогідродинаміки в програмному пакеті LS-DYNA. Отримані чисельні результати порівняно з експериментальними даними програми Blind Blast Test.

У роботі [2] встановлено, що за незмінної маси та висоти розташування вибухового заряду найбільший обсяг пошкодження бетону відповідає співвідношенню геометричних розмірів заряду 1:1. Показано, що зі збільшенням висоти розташування заряду за сталих інших параметрів інтенсивність пошкодження бетону зменшується, тоді як за постійного співвідношення розмірів вибухівки обсяг пошкоджень лінійно зростає зі збільшенням тротилового еквівалента вибуху.

У роботі [3] систематизовано дані щодо впливу ударно-вибухових навантажень на будівельні конструкції та обґрунтовано вимоги до проектування будівель і споруд цивільного захисту в умовах можливих вибухових впливів. Проаналізовано характер дії вибухової ударної хвилі та особливості розподілу тиску на конструкції залежно від відстані до епіцентру вибуху, а також сформульовано рекомендації щодо підвищення їх стійкості.

У роботі [4] розглянуто теоретичні та практичні аспекти випробування будівельних конструкцій під дією динамічних навантажень на фізичних моделях. Показано необхідність урахування втрати несучої здатності конструкцій при динамічних впливах і забезпечення їх роботи поза резонансними частотними діапазонами відповідно до вимог проектування та експлуатації.

У роботі [5] виконано дослідження вібраційної реакції будівель у межах реального інженерного проекту за дії вибухового навантаження з масою заряду 30 кг на відстанях 50–250 м від епіцентру. На основі поєднання теоретичного аналізу, польових випробувань і чисельного моделювання з використанням формули Садовського та програмних комплексів ANSYS/LS-DYNA встановлено закономірності поширення пікової швидкості частинок і її зв'язок із напруженим станом конструкцій.

У роботі [6] запропоновано підходи до оцінювання впливу багатоциклових вібродинамічних навантажень на надійність будівельних конструкцій. Обґрунтовано необхідність удосконалення чисельних моделей з урахуванням відмінностей між розрахунковими та експериментально визначеними динамічними характеристиками будівель і споруд.

У роботі [7] виконано аналіз стану будівель і споруд, пошкоджених унаслідок воєнних дій, з урахуванням випадків вибуху поблизу об'єкта та прямого влучання. Показано, що при непрямому впливі переважно пошкоджуються огорожувальні конструкції та покрівля, тоді як пряме влучання супроводжується частковим руйнуванням несучих елементів. За результатами порівняльного аналізу встановлено, що найбільш стійкими є каркасно-монолітні будівлі, а найменш стійкими – панельні, при цьому характер пошкоджень загалом не залежить від типу будівлі, але має конструктивно зумовлені особливості.

У роботі [8] розглянуто можливості інтеграції методів штучного інтелекту в інженерію пожежної безпеки будівель на основі аналізу сучасних підходів до чисельного моделювання пожеж. Запропоновано рекомендації щодо формування комплексних пожежних баз даних та проаналізовано алгоритми штучного інтелекту, придатні для виявлення й прогнозування сценаріїв пожеж і підтримки інтелектуальних систем пожежогасіння.

У роботі [9] автори розглядають методіку розрахунку стійкості будівель до прогресуючого обвалення під дією комбінованих навантажень пожежі та вибуху. Вона включає аналіз локального руйнування окремих елементів конструкції та подальшого перерозподілу зусиль у несучій системі, а також врахування термічного впливу пожежі на міцність матеріалів. Методика дозволяє визначати найбільш уразливі елементи конструкції та прогнозувати розвиток прогресуючого обвалення, що підвищує точність інженерних рішень при забезпеченні безпеки будівель.

У роботі [10] досліджено вибір матеріалу та товщини захисної стіни для будівель за умов вибуху водню різної потужності. Показано, що оптимальні конструктивні параметри захисних стін значно знижують ризик пошкодження основних несучих елементів. Результати мають практичне значення для проектування промислових та енергетичних об'єктів, що піддаються ризику вибухових впливів.

У роботі [11] продемонстровано програмну реалізацію методіки оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення. Програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес аналізу аварійних сценаріїв, урахувати різні типи початкових пошкоджень та зміну фізико-механічних властивостей матеріалів. Це підвищує оперативність та точність оцінки технічного стану будівель у надзвичайних умовах.

У роботі [12] запропоновано удосконалену термомеханічну модель поведінки залізобетонних конструкцій під дією пожежі та вибуху. Модель поєднує тепловий та механічний аналіз, враховує нелінійну поведінку матеріалів, втрату жорсткості та міцності елементів у часі. Це дозволяє більш точно прогнозувати граничні стани конструкцій і момент втрати несучої здатності, що є критично важливим для безпеки людей.

За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що існуючі методіки оцінки стійкості будівель до вибухових та пожежних навантажень охоплюють широкий спектр підходів: від чисельного моделювання матеріалів і конструкцій до програмної реалізації оцінки аварійних сценаріїв. Водночас залишаються відкритими питання, пов'язані із комплексним урахуванням комбінованих впливів вибуху та пожежі на будівлі різного конструктивного типу, а також адаптацією методик до умов воєнного стану.

3 ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – провести аналіз надійності будівельних конструкцій будівель та споруд при дії вибухової хвилі в умовах воєнного стану з урахуванням забезпечення безпеки людей під час пожеж.

Для досягнення мети були поставлені наукові завдання:

1. Провести аналіз основних положень розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами та виконати огляд можливостей і функцій програмного комплексу «Ліра-САПР».

2. Провести моделювання будівлі виробничого об'єкта на вплив вибухової хвилі від вибуху за допомогою методу комп'ютерного моделювання.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Аналіз основних положень розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами та огляд можливостей і функцій програмного комплексу «Ліра-САПР».

Надійність будівельних конструкцій визначається якістю проектних рішень, відповідністю виконаних робіт проектній документації, правильністю виконання будівельно-монтажних робіт та умовами експлуатації. Недотримання норм і технологій призводить до пошкодження конструкцій і розвитку прогресуючого обвалення, що є критично важливим при оцінці безпеки людей.

Для забезпечення надійності будівельних конструкцій на стадії проектування застосовують чисельні методи з використанням програмних комплексів, серед яких ПК «Ліра-САПР» відзначається широкими можливостями інтеграції з технологією інформаційного моделювання будівель (BIM) та CAD-додатками через стандартизовані формати даних (DXF, IFC, STP, STL та інші). Система підтримує створення моделей будівель і споруд з урахуванням різних конструктивних схем, матеріалів та експлуатаційних умов.

ПК «Ліра-САПР» дозволяє проводити розрахунки конструкцій під статичні та динамічні навантаження, включно з сейсмічними, вітровими, імпульсними, ударними та вібраційними впливами. Для сейсмічних навантажень реалізовані вимоги нормативів України та інших країн. Комплекс дозволяє визначати головні і еквівалентні напруги та здійснювати перевірку міцності за різними теоріями: Губера-Мізеса, Мора, Друкера-Прагера, Писаренко-Лебедева, Кулона-Мора та іншими.

Фізична нелінійність матеріалів моделюється через різноманітні залежності σ - ε , що дозволяє відстежувати розвиток тріщин, прояв деформацій повзучості та плинності матеріалів. Моделювання охоплює як моно-, так і бі-матеріальні конструкції, забезпечуючи прогнозування локального руйнування елементів та перерозподілу зусиль у несучій системі до моменту втрати несучої здатності.

ПК «Ліра-САПР» забезпечує аналіз граничних станів конструкцій, що включає перевірку міцності елементів, оцінку впливу динамічних навантажень, аналіз взаємодії окремих елементів системи та оцінку ризику прогресуючого обвалення. Це дозволяє здійснювати більш точне прогнозування технічного стану будівель і споруд, підвищуючи рівень безпеки для людей у разі аварійних навантажень, включно з вибуховими та пожежними впливами.

4.2. Моделювання будівлі виробничого об'єкта на вплив вибухової хвилі від вибуху вибухової речовини за допомогою методу комп'ютерного моделювання.

Об'єктом дослідження є одноповерхова виробнича будівля зі сталевим каркасом (рис. 1). Геометричні розміри будівлі становлять: висота до конька покриття – 12 м, висота до нижнього поясу ферм – 3 м, довжина – 60 м, ширина – 15 м.

Колони каркасу виконані зі сталевих двотаврових профілів. Закріплення колон у фундаментах прийнято жорстким у повздовжньому та поперечному напрямках. Покриття будівлі спирається на сталеві ферми, виготовлені з гнутих зварних профілів; опирання ферм на колони – шарнірне. Ригелі покриття виконані зі швелерів. Просторова жорсткість каркасу забезпечується системою вертикальних і горизонтальних зв'язків по колонах і фермах, виконаних з одиночних рівнополкових кутників.

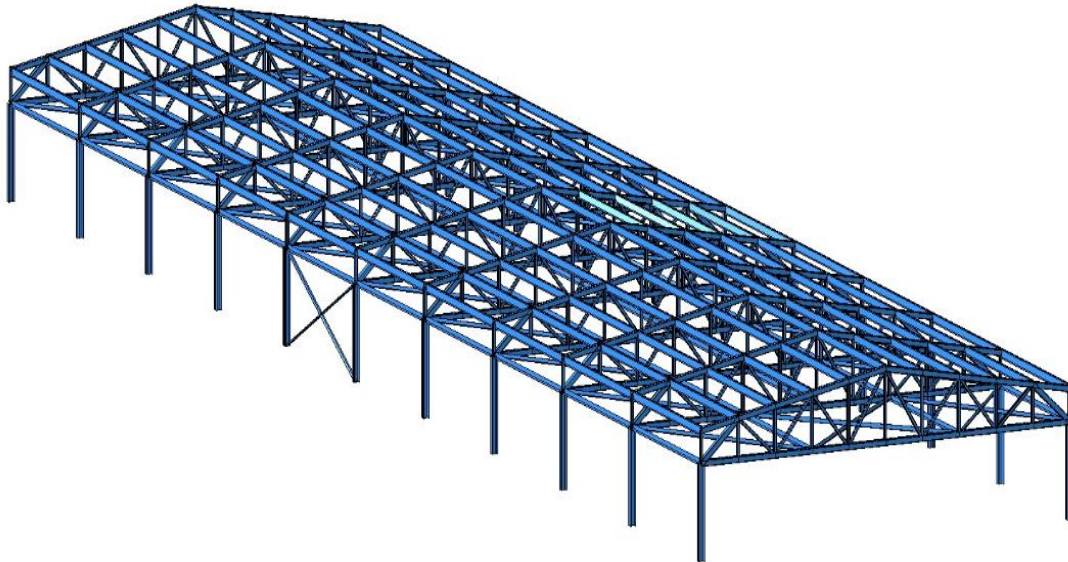


Рис. 1. Тривимірний розрахунковий схем будівлі

Аварійна дія, що розглядається, пов'язана з вибухом вибухової речовини – тринітротолуолу – на відкритій місцевості на відстані 500 м від будівлі. Вибух призводить до формування повітряної ударної хвилі, яка діє на зовнішні поверхні будівлі та її несучі елементи у вигляді короточасного імпульсного навантаження.

У розрахунковій моделі враховано види навантажень і впливів:

1. Власна вага конструкцій – постійне навантаження, яке автоматично враховується в моделі з коефіцієнтом надійності за навантаженням 1,05.
2. Вага огорожувальних конструкцій – постійне навантаження, що включає:
 - навантаження від покрівельного огороження у вигляді рівномірно розподіленого навантаження на прогони;
 - навантаження від стінового огороження у вигляді зосереджених сил, прикладених до основних колон каркасу та колон фахверка.
3. Кліматичні навантаження – снігове та вітрове навантаження, прийняті відповідно до чинних нормативних документів (згідно з додатками).
4. Особливе навантаження – тиск вибухової ударної хвилі, спричинений вибухом вибухової речовини.

Вихідними даними для визначення параметрів вибухової ударної хвилі є маса вибухової речовини $M_{вр}$ (кг) та відстань від центру вибуху до розглянутої точки R (м).

Параметри вибухової ударної хвилі залежать від наведеної відстані

$$R = \frac{R}{\sqrt[3]{Q_{эф}}}, \quad (1)$$

де $Q_{эф}$ – ефективна маса, яка дорівнює

$$Q_{эф} = (1 - \varepsilon)\alpha M_{вр}, \quad (2)$$

де ε – частка енергії вибуху, що витрачається на утворення вирви, в даній ситуації прийнято рівною 0;

α – відношення питомої енергії вибуху вибухової речовини, дорівнює 1,0, якщо тип вибухової речовини невідомий, то можна приймати $\alpha = 1,5$.

За умови $M_{вр} = 60000$ кг отримаємо:

$$Q_{эф} = (1 - 0) \cdot 1 \cdot 60000 = 60000 \text{ кг,}$$

$$R = \frac{500}{\sqrt[3]{60000}} = 12,8 (\text{м} / \text{кг}^{1/3}).$$

Надмірний тиск на фронті вибухової хвилі визначається за емпіричною залежністю

$$\left(\Delta\rho_{\phi} = \frac{0,92}{R} + \frac{3,5}{R^2} + \frac{10,6}{R^3} \right) \cdot 10^5. \quad (3)$$

Підставивши значення наведеної відстані, отримано $\Delta\rho_{\phi} = 1002 \text{ тс} / \text{м}^2$ або 9,83 МПа.

Розрахований надмірний тиск вибухової хвилі прикладається в розрахунковій моделі у вигляді рівномірно розподіленого динамічного навантаження на несучі елементи будівлі, зокрема на колони сталевого каркасу, з урахуванням напрямку поширення вибухової хвилі.

Навантаження від покриття задаються на прогони в окремому завантаженні у вигляді рівномірно розподіленого навантаження (рис. 2).

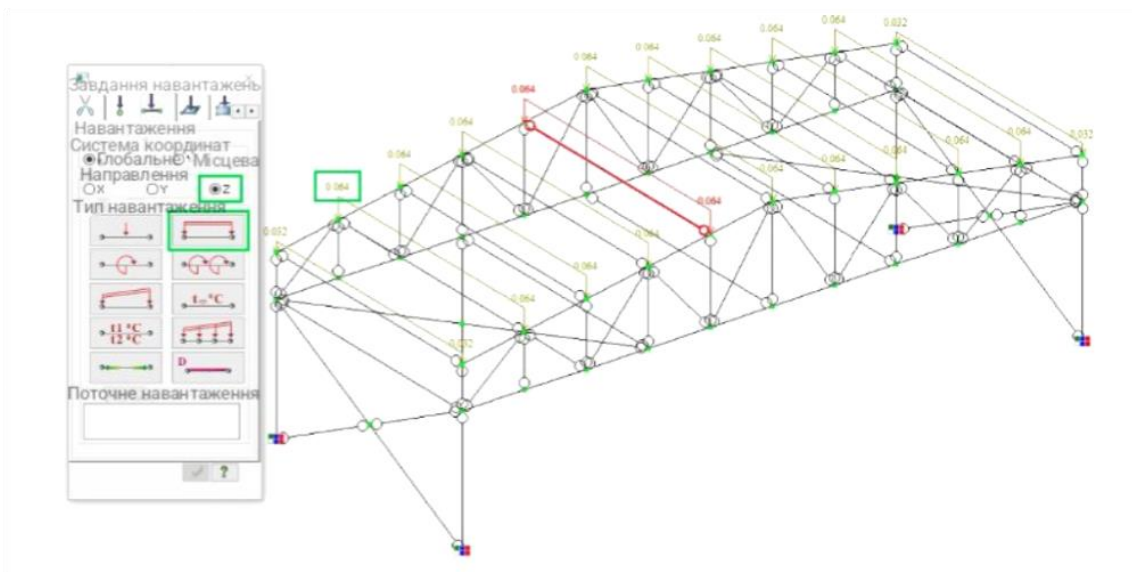


Рис. 2. Схема задання навантаження на прогони покриття

Кліматичні навантаження від снігу задаються аналогічним способом відповідно до нормативних вимог.

Вітрове навантаження прикладається до колон каркасу в окремому завантаженні у вигляді рівномірно розподіленого навантаження (рис. 3).

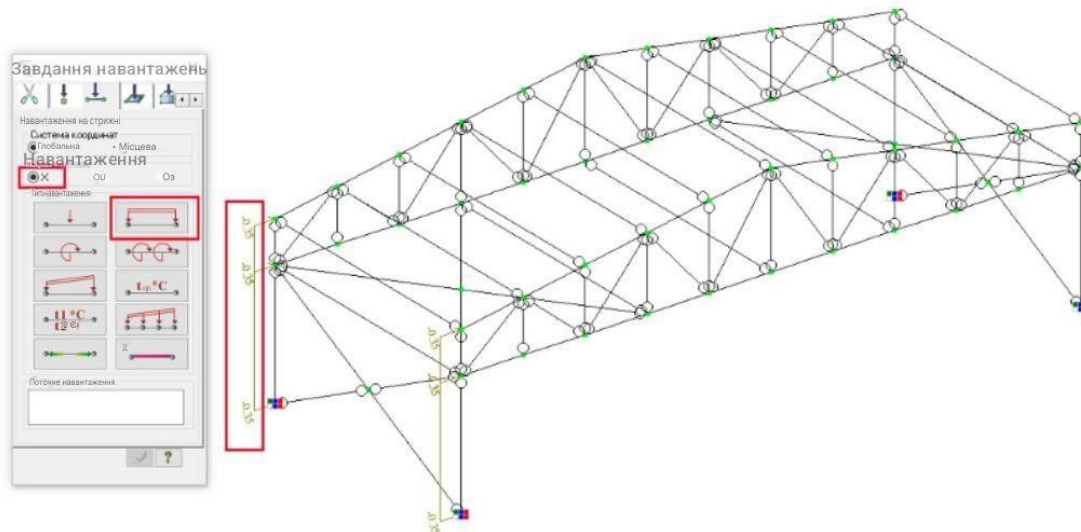


Рис. 3. Схема задання вітрового навантаження

Навантаження від вибуху має імпульсний, миттєвий характер дії та викликає вимушені коливання будівлі, які формуються під впливом різкого зростання тиску на несучі елементи. Такий характер навантаження відрізняється від тривалих або квазістатичних впливів і потребує окремого підходу при моделюванні. Для коректного врахування впливу вибухової ударної хвилі розглядаються два типи завантажень: статичне та динамічне.

Статична складова вибухового навантаження застосовується до основних несучих елементів будівлі, зокрема до колон каркасу, та використовується для визначення початкового розподілу зусиль і напружень без врахування інерційних ефектів. Вона дозволяє врахувати середній рівень силового впливу вибуху та створити базову напружено-деформовану схему конструкції.

Динамічна складова задається окремим завантаженням і включає вплив статичної складової як початкове збуджувальне навантаження. Це дозволяє врахувати інерційні сили, що виникають у конструкціях через швидку зміну навантаження, а також оцінити реакцію будівлі у вигляді додаткових переміщень і зусиль. Такий підхід забезпечує можливість прогнозування локальної концентрації напружень, розвитку деформацій та потенційних зон ушкоджень у конструкції.

Після задання всіх постійних, тимчасових, кліматичних та особливих навантажень формується набір розрахункових поєднань. Будівельні конструкції розраховуються на найбільш несприятливі комбінації навантажень, що дозволяє визначити критичні умови роботи елементів конструкції. Для кожного поєднання проводиться перевірка відповідності граничним станам першої та другої групи, що забезпечує оцінку міцності, стійкості та працездатності конструкцій.

Результатом розрахунку є визначені внутрішні зусилля та переміщення елементів конструкції, що використовуються для подальшого конструктивного аналізу та оптимізації будівельних рішень. На основі цих даних формується деформована схема будівлі, що дозволяє візуалізувати слабкі ділянки конструкції та оцінити ефективність обраних заходів щодо забезпечення безпеки (рис. 4).

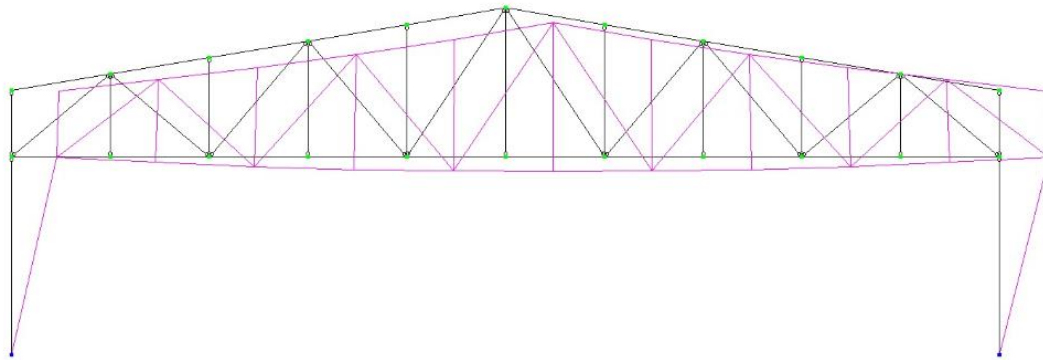


Рис. 4. Деформована схема будівлі

Результати розрахунку показали розподіл внутрішніх зусиль та переміщень у елементах рами під впливом вибухової ударної хвилі. Максимальні осьові зусилля N у колоні рами наведені на рис. 5.

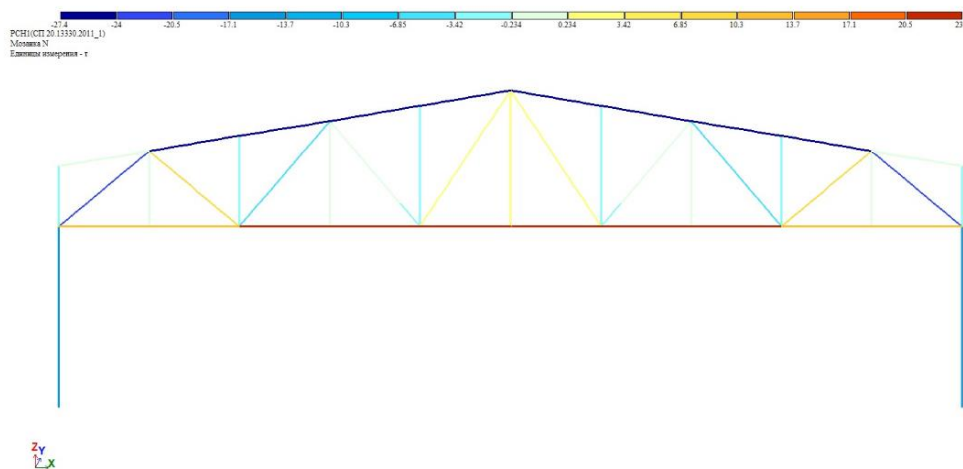


Рис. 5. Максимальні осьові зусилля N в елементах рами

Аналіз згинальних моментів M_y показав, що найбільше навантаження припадає на колони, де $M_y = 17,4$ (рис. 6). В інших елементах рами – верхньому та нижньому поясах ферми, опорних розкосах та решітках ферми – згинальні моменти практично відсутні, що свідчить про їхню переважну роботу на розтяг та стиск, а не на згин.

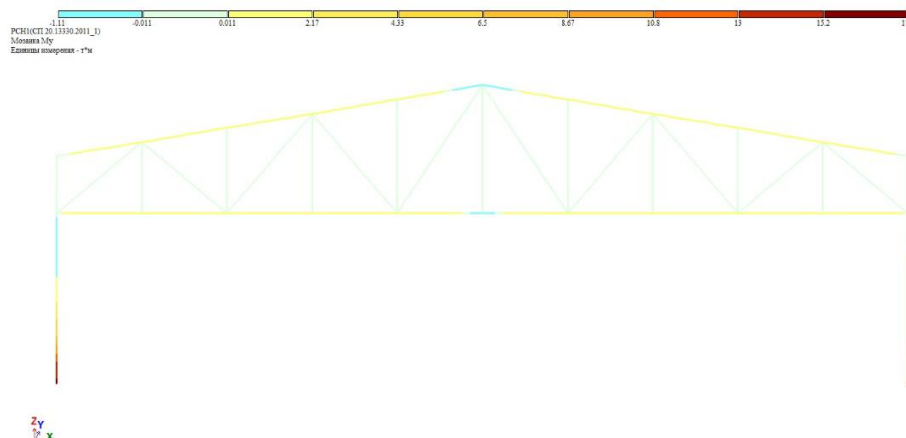


Рис. 6. Максимальні згинальні моменти M_y в елементах рами

Максимальні переміщення конструкції також були визначені для двох головних осей координат: вздовж осі X – 41,8 мм (рис. 7), вздовж осі Z – 12,2 мм (рис. 8). Ці значення відображають реакцію конструкції на миттєве навантаження вибуху та дозволяють оцінити потенційні деформації, які можуть впливати на працездатність несучих елементів та огорожувальних конструкцій.

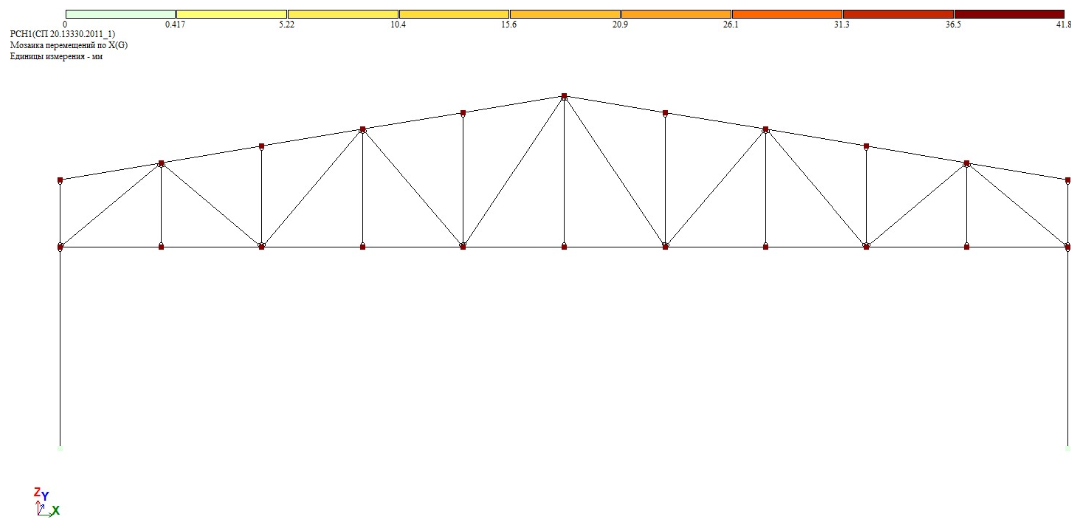


Рис. 7. Мозаїка переміщень уздовж осі X , мм

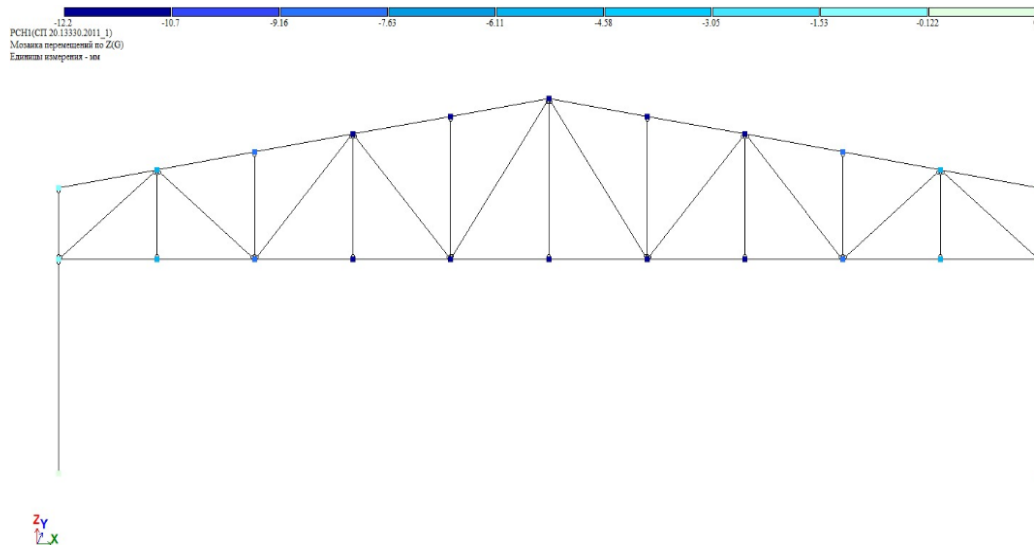


Рис. 8. Мозаїка переміщень уздовж осі Z , мм

Перевірка конструкції за I групою граничних станів показала, що міцність колони не забезпечена, тобто даний елемент не відповідає нормативним вимогам. Інші елементи – нижній та верхній пояси ферми, опорний розкіс ферми та решітка ферми – задовольняють вимоги I групи граничних станів. Це означає, що при розглянутих навантаженнях вони здатні витримати прикладені сили без локального руйнування або втрати несучої здатності.

Отримані результати дозволяють ідентифікувати слабкі елементи конструкції, які слід укріпити або замінити матеріал для забезпечення безпечної експлуатації будівлі під впливом вибухових навантажень.

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розглянуті можливості програмного комплексу «ЛІРА-САПР» забезпечують реалізацію розрахунків за граничними станами для різних конструктивних схем і типів навантажень, з урахуванням нелінійної роботи матеріалів. Застосування модулів динамічного аналізу, критеріїв міцності та засобів моделювання фізичної нелінійності створює умови для чисельного відтворення напружено-деформованого стану конструкцій і визначення граничних умов їх працездатності в аварійних режимах.

6 ВИСНОВКИ

1. Основні положення розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами орієнтовані на використання чисельних методів з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності для оцінювання надійності та безпеки будівель і споруд за дії складних навантажень. Урахування динамічних впливів є необхідним для коректного визначення напружено-деформованого стану конструкцій, аналізу локальних пошкоджень, перерозподілу зусиль у несучих системах та можливого розвитку прогресуючого обвалення.

2. За результатами моделювання встановлено, що найбільше навантаження від вибухової ударної хвилі припадає на колони сталевого каркасу, де виникають максимальні осьові зусилля та згинальні моменти, тоді як ферми, опорні розкоси та решітка конструкції працюють переважно на стиск і розтяг. Динамічний вплив вибуху спричиняє миттєві переміщення будівлі, що вказує на можливі локальні концентрації напружень та деформацій. Перевірка за I групою граничних станів показала, що колони не забезпечують необхідну міцність, тоді як інші елементи конструкції відповідають нормативним вимогам, що дозволяє визначити слабкі ділянки для посилення або заміни матеріалу.

7 ЕТИЧНІ ДЕКЛАРАЦІЇ

Автори не мають відповідних фінансових чи нефінансових інтересів, які слід розкривати.

Література

1. Kelasyev, N.G., Avdeev, K.V., Levin, D.I., Bobrov, V.V. (2023). Models of Concrete and Reinforcement under Explosive Loads. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-14-21
2. Yao, H.W., Jia, X., Huang, Z.X., Yang, C.Z., Shang, W. (2023, April). Research on the damage law of reinforced concrete beams caused by cuboid explosives under contact explosion. Journal of Physics: Conference Series. 2460(1). 012090. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/2460/1/012090
3. Ivanchenko, H., Hetun, H., Bezklubenko, I., Solomin, A., Posternak, O. (2023). Influence of Explosive Loads on Buildings and Structures of the Population Civil Protection. Strength of Materials and Theory of Structures. 111. 39–48.
4. Rotaru, A. (2023). Dynamic load assessment of building structures. E3S Web of Conferences. 402. 07015. EDP Sciences. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340207015>
5. Yuan, Y., Gao, Z., He, L., Lei, Z. (2024). Research on the Vibration Response of High-Rise Buildings under Blasting Load. Mathematics. 12(20). 3165. URL: <https://doi.org/10.3390/math12203165>
6. Mogilyuk, Z.G., Tereshin, A.A., Alekseev, G.V. (2024). Computational Models of Dynamic Load Sources for Modeling of Construction Structures Operation Used in Monitoring of Technical Condition of Buildings and Structures. Buildings. 14(10). DOI: 10.3390/buildings14103193

7. Меньлюк О.І., Меньлюк І.О., Русский В.В. Дослідження стану будівель та споруд пошкоджених внаслідок воєнних дій. *Building Production*. 2023. № 75. С. 17–26. URL: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.75.17-26>
8. Ruchit, P. (2024). Applications of artificial intelligence in enhancing building fire safety. *International Journal*. 13(1). 1117–1132.
9. Майборода Р.І., Отрош Ю.А. Дослідження методики розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху. *Комунальне господарство міст*. 2025. № 3(191). С. 485–495. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-485-495>
10. 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. URL: <https://doi.org/10.4028/p-ST1VeT>
11. Майборода Р.І., Отрош Ю.А. Програмна реалізація оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2025. № 1(41). С. 177–193. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25353>
12. Maiboroda, R., Otroch, Yu. (2025). Improved thermomechanical model for predicting the behaviour of reinforced concrete structures under fire and explosion conditions. *Mechanics and Mathematical Methods*. VII(2). 66–85. URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-2-66-85>.

References

1. Kelasyev, N.G., Avdeev, K.V., Levin, D.I., Bobrov, V.V. (2023). Models of Concrete and Reinforcement under Explosive Loads. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-3-14-21
2. Yao, H.W., Jia, X., Huang, Z.X., Yang, C.Z., Shang, W. (2023, April). Research on the damage law of reinforced concrete beams caused by cuboid explosives under contact explosion. *Journal of Physics: Conference Series*. 2460(1). 012090. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/2460/1/012090
3. Ivanchenko, H., Hetun, H., Bezklubenko, I., Solomin, A., Posternak, O. (2023). Influence of Explosive Loads on Buildings and Structures of the Population Civil Protection. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 111. 39–48.
4. Rotaru, A. (2023). Dynamic load assessment of building structures. *E3S Web of Conferences*. 402. 07015. EDP Sciences. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340207015>
5. Yuan, Y., Gao, Z., He, L., Lei, Z. (2024). Research on the Vibration Response of High-Rise Buildings under Blasting Load. *Mathematics*. 12(20). 3165. URL: <https://doi.org/10.3390/math12203165>
6. Mogilyuk, Z.G., Tereshin, A.A., Alekseev, G.V. (2024). Computational Models of Dynamic Load Sources for Modeling of Construction Structures Operation Used in Monitoring of Technical Condition of Buildings and Structures. *Buildings*. 14(10). DOI: 10.3390/buildings14103193
7. Menelylyuk, O.I., Menelylyuk, I.O., Russky, V.V. (2023). Doslidzhennya stanu ta poskodzhennya budivel' vnaslidok voyennykh diy. *Building Production*. 75. 17–26. URL: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.75.17-26>
8. Ruchit, P. (2024). Applications of artificial intelligence in enhancing building fire safety. *International Journal*. 13(1). 1117–1132.
9. Mayboroda, R.I., Otrosh, Yu.A. (2025). Doslidzhennya metodyky rozrakhunku stiykosti do prohresu obvalennya budivel' vnaslidok pozhezhi vybukhu. *Komunal'ne hospodarstvo mist*. 3(191). 485–495. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-485-495>
10. 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. URL: <https://doi.org/10.4028/p-ST1VeT>
11. Mayboroda, R.I., Otrosh, Yu.A. (2025). Prohramna realizatsiya otsinky konstruktsiyi do prohresuvannya stiykosti obvalennya. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy*. 1(41). 177–193. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25353>
12. Maiboroda, R., Otroch, Yu. (2025). Improved thermomechanical model for predicting the behaviour of reinforced concrete structures under fire and explosion conditions. *Mechanics and*

Mathematical Methods. VII(2). 66–85. URL: <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2025-7-2-66-85>

Стаття надійшла до редакції 21.01.2026

Стаття прийнята до друку 28.02.2026

Дата публікації статті 26.03.2026

Пурденко Роман Русланович

Національний університет цивільного захисту України
аспірант

вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18000

ORCID: 0000-0001-6467-4133

Отрош Юрій Анатолійович

Національний університет цивільного захисту України
д.т.н., професор, начальник кафедри

вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18000

otrosh_yurii@nuczu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-0698-2888

Рашкевич Ніна Владиславна

Черкаський державний технологічний університет

доктор філософії, доцент

вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18000

rashkevych_nina@nuczu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-5124-6068

Для посилань:

Пурденко Р. Р., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В. Оцінка надійності будівельних конструкцій під впливом вибухових навантажень . Механіка та математичні методи, 2026. Т. VIII. № 1. С. 28–40.

For references:

R. Purdenko, Yu. Otrosh, N. Rashkevich (2026). Assessment of the reliability of building structures under the effect of explosive loads. Mechanics and mathematical methods. VIII (1). 28–40.

Оцінка надійності будівельних конструкцій під впливом вибухових навантажень © 2026 by Пурденко Р. Р., Отрош Ю. А., Рашкевич Н. В. is licensed under CC BY 4.0