

РОЗРАХУНОК БУДІВЛІ НА ВПЛИВ ДІЇ ПОВІТРЯНОЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ ПРЯМИМ ДИНАМІЧНИМ МЕТОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПК ЛІРА-САПР

Марина РОМАШКІНА¹, Богдан ПІСАРЕВСЬКИЙ², Олексій ЖУРАВЛЬОВ³

^{1,2,3}ТОВ «ЛІРА САПР»,
провулок Киянівський, 7-а, Київ, Україна, 04053
^{1,2}Технічний центр НАН України,
вул. Покровська, 13, Київ, Україна, 04070
¹romashkina.liraland@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7158-4037>
²mikst1234@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1001-2879>
³tischenko@liraland.com.ua, <https://orcid.org/0009-0009-0951-8889>

Анотація. Розрахунок впливу повітряної ударної хвилі на будівлі є надзвичайно важливим для нашої країни, яка перебуває в умовах воєнних дій. Дослідження конструктивної безпеки та живучості несних конструкцій при таких впливах є важливою задачею, особливо для об'єктів критичної інфраструктури. Сценарій вибуху можна змоделювати за допомогою програм які реалізують метод скінченних елементів з можливістю виконання розрахунку прямим динамічним методом. І таким чином оцінити ступінь пошкодження будівель та мінімізувати загибель людей.

Стаття присвячена особливостям розрахунку будівель на вплив дії повітряної ударної хвилі методом скінченних елементів із використанням програмного комплексу ЛІРА-FEM (ЛІРА-САПР). Розглянуто типові параметри вибухової хвилі, властивості вибухових навантажень та послідовність розрахунку на вибухові навантаження. Описані основні відмінності вибухових і ударних впливів від звичайних навантажень. Детально розглянуто питання визначення параметрів ударних хвиль та їх впливу на споруди. Описано методи розрахунку конструкцій на вибухові дії.

Проведено попередню оцінку вибухостійкості одноповерхової будівлі з металевим каркасом і стіновим заповненням з листового металу за допомогою ЛІРА-FEM (ЛІРА-САПР). Продемонстровано процес призначення імпульсних навантажень від ударної хвилі на стіни, повернуті до вибуху, бічні стіни, покриття та тильні стіни. Описані особливості використання модуля «Динаміка в часі» в ЛІРА-FEM (ЛІРА-САПР) для вирішення задач динаміки вибухів.

© М. РОМАШКІНА, Б. ПІСАРЕВСЬКИЙ, О. ЖУРАВЛЬОВ, 2024



Марина РОМАШКІНА
науковий співробітник,
провідний інженер
к.т.н



Богдан ПІСАРЕВСЬКИЙ
науковий співробітник,
к.т.н



Олексій ЖУРАВЛЬОВ
технічний директор
ТОВ «ЛІРА-САПР»

Також розглянуто його застосування для перегляду, аналізу результатів, конструювання та документування.

Цей аналіз допомагає в оцінці ризиків при проектуванні захисних структур, розробці проектних рішень та проведенні досліджень у сфері вибухобезпеки.

Ключові слова. Аварійний вибуховий вплив; повітряна ударна хвиля; динамічні навантаження; скінчено-елементний розрахунок; ЛІРА-FEM (ЛІРА-САПР).

ВСТУП

Через активні бойові дії на території нашої країни кількість будівель та інженерних споруд, які піддаються впливу вибухових хвиль, зростають щодня. Розрахунок на вплив дії повітряної ударної хвилі дозволяє виявити та посилити вразливі місця конструкцій, що може врятувати життя людей і зменшити ризики пошкоджень. Однією з ключових задач загальної проблеми вибухонебезпеки є здатність визначати навантаження на будівельні та вибухостійкі конструкції.

Оскільки вибухові процеси є нестационарними, необхідно мати змогу визначати їх динамічні характеристики, враховуючи складну ударно-хвильову взаємодію повітряної ударної хвилі як руйнівного фактора для будівельної конструкції. Складність цієї задачі вимагає розширення арсеналу сучасних розрахункових методів за допомогою нових підходів до визначення форми силового імпульсу, що передається будівельній конструкції від ударної хвилі. Мета даної статті полягає в підвищенні безпеки будівельних споруд шляхом прогнозування наслідків впливу ударних повітряних хвиль за допомогою чисельного моделювання.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Одним з основних факторів ураження будь-якого вибуху є ударна хвиля. Ударна хвиля — це зона стиснутого повітря, яка поширюється у всі боки від центру вибуху зі швидкістю, вищою за швидкість звуку та може мати руйнівний вплив на навколишні об'єкти. Дія ударної хвилі на елементи споруд характеризується складним комплексом навантажень: прямий тиск, тиск відбиття, тиск обтікання, тиск затікання, навантаження від сейсмовибухових хвиль [1-3].

Згідно з вимогами будівельних норм, певні типи будівельних або інженерних споруд (наприклад, захисні споруди, споруди подвійного призначення (СПП) тощо) розраховуються з урахуванням впливу дії повітряної ударної хвилі на конструкції.

Деякі норми [4-6] для спрощення розрахунків рекомендують розраховувати огорожувальні та несні конструкції захисних споруд та СПП на особливе поєднання навантажень, що складається з постійних, тимчасових навантажень та статичного навантаження еквівалентного дії динамічного навантаження від дії ударної хвилі (еквівалентне статичне навантаження). Також норми [4] допускають використання прямого динамічного аналізу конструктивних систем на динамічні дії повітряної ударної хвилі, що викликають значне прискорення конструкції.

Для визначення напружено-деформованого стану (НДС) несних конструкцій при зовнішньому вибуху доцільно застосування програмних комплексів (ПК), що реалізують метод скінченних елементів. Не мало важливим фактором при виборі ПК для аналізу міцності є можливість виконання розрахунку прямим динамічним методом [7-16]. Оскільки навантаження від вибухів відносяться до швидкоплинних процесів і має явно виражений динамічний характер.

Далі розглянемо особливості розрахунку навантаження від дії повітряної ударної хвилі та виконаємо спрощений розрахунок будівлі на вплив такої хвилі згідно з прикладом 2.1, наведеним в посібнику AISC Steel Design Guide 26 - Design of Blast Resistant Structures (Розрахунок вибухостійких конструкцій) [17]. Цей приклад стосується оцінки вибухостійкості одноповерхової будівлі з металевим каркасом і стіновим заповненням з листового металу.

Ідеалізований графік зміни тиску вибуху у часі.

Для визначення характеристик одного з основних факторів ураження від вибуху, необхідних для подальших розрахунків, розглянемо профіль повітряної ударної хвилі. На рис. 1 зображено ідеалізований графік зміни тиску вибуху у часі, який показує, як змінюється тиск у точці простору після вибуху.

На графіку зображені такі ключові параметри, як:

P_r або P_{so} - максимальне значення надмірного тиску, досягнуте після вибуху.

t_a - час досягнення пікового тиску. Часовий інтервал від початку вибуху до досягнення максимального тиску.

t_d - тривалість позитивної фази (зона стиснення). Часовий інтервал від моменту досягнення пікового тиску до повернення тиску до атмосферного рівня.

I - позитивний імпульс. Загальну кількість енергії, переданої вибуховою хвилею на одиницю площі за час позитивної фази. Іншими словами, це площа під кривою

тиску під час позитивної фази, коли тиск перевищує атмосферний рівень.

t_d - тривалість негативної фази (зона розрідження). Часовий інтервал, протягом якого тиск падає нижче атмосферного тиску після початкового піку. Відповідно, негативний імпульс вибуху визначається як інтеграл (площа під кривою) негативної фази графіка зміни тиску вибуху у часі. Цей імпульс відображає величину та тривалість зниження тиску під час негативної фази.

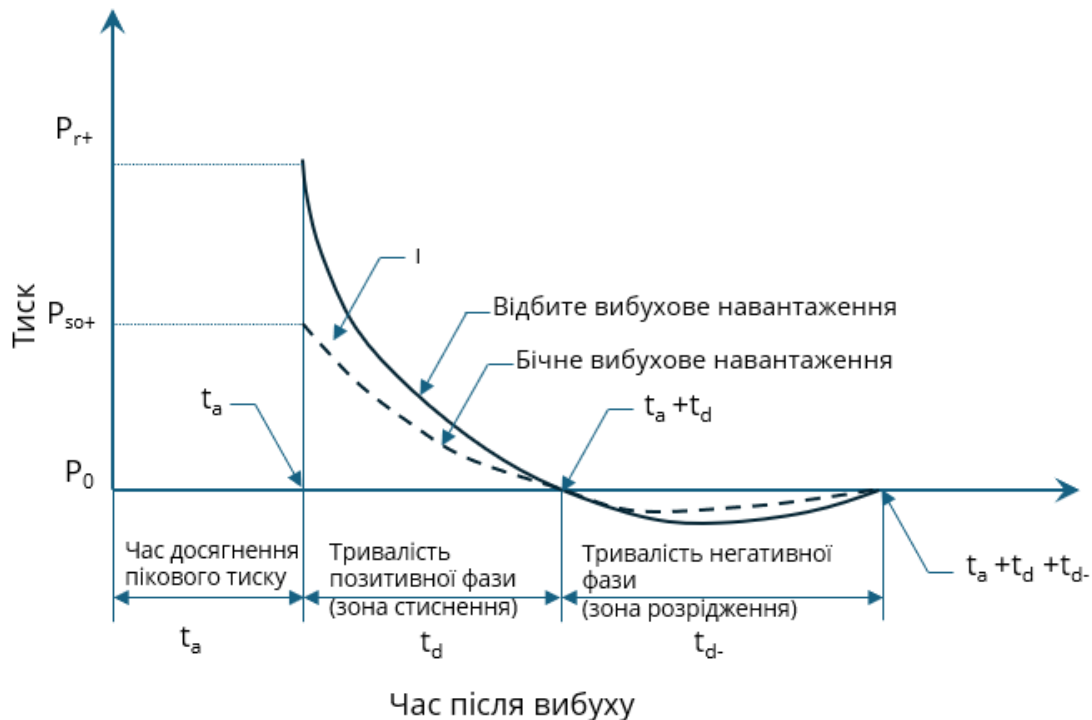


Рис.1. Ідеалізований графік залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі
Fig. 1. Idealised graph: change of blast wave pressure in time

На графіку (рис.1) зображено дві криві. Відбите вибухове навантаження показано суцільною лінією. І бічне вибухове навантаження – показане пунктирною лінією.

Бічне вибухове навантаження (навантаження від вибуху в умовах відкритого простору) позначається індексом "so". Це тиск, який створений вибуховою хвилею у відкритому просторі, без врахування впливу перешкод або конструкцій, що можуть змінити або відбити ударну хвилю. Таке навантаження діє на поверхні, які розташовані паралельно напрямку дії повітряної ударної хвилі і по яким хвиля рухається без переш-

код (тобто відбувається обтікання). Це можуть бути бокові стіни і покриття, які не знаходяться безпосередньо в зоні прямої дії вибуху.

У разі, коли вибухова хвиля вдаряється у непаралельну похилу поверхню, виникає відбите вибухове навантаження, яке позначене індексом «г». Гарним прикладом, в цьому випадку, буде будь-яка поверхня перпендикулярна до вибухової хвилі, наприклад, передня фасадна стіна. Відбиваючі

поверхні будинків у таких випадках посилюють тиск і, в результаті, імпульс. Очевидно, що в цьому випадку буде значно більший тиск, ніж при проходженні хвилі над поверхнею, яка паралельна їй.

Для визначення значення відбитого тиску P_r можна застосувати таке рівняння.

$$P_r = C_r * P_{so}$$

де P_{so} – це тангенціальний тиск (тиск, що діє паралельно до поверхні об'єкта),

C_r – коефіцієнт, який враховує відбиття повітряної ударної хвилі. C_r є функцією кута падіння хвилі та тангенціального тиску.

На рисунку 2 показано, яким чином можна розрахувати кут падіння з урахуванням початкового напрямку вибухової хвилі та хвилі, відбитої від цієї поверхні по нормалі.

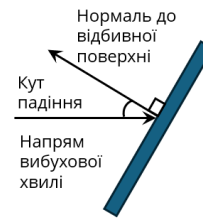


Рис. 2. Відбитий кут падіння вибухової хвилі

Fig. 2. Reflected angle of incidence for a blast wave

Для визначення коефіцієнта відбиття C_r , необхідно знайти значення кута падіння на осі x графіка, зображеного на рис. 3 [17].

Відповідно на рис. 3 наведено графіки кривих функціональної залежності коефіцієнта відбитого тиску вибухової хвилі C_r , що являє собою відношення відбитого тиску P_r до тангенціального тиску P_{so} , від кута відбиття α при взаємодії хвилі та споруди за різних значень тангенціального тиску [18-19].

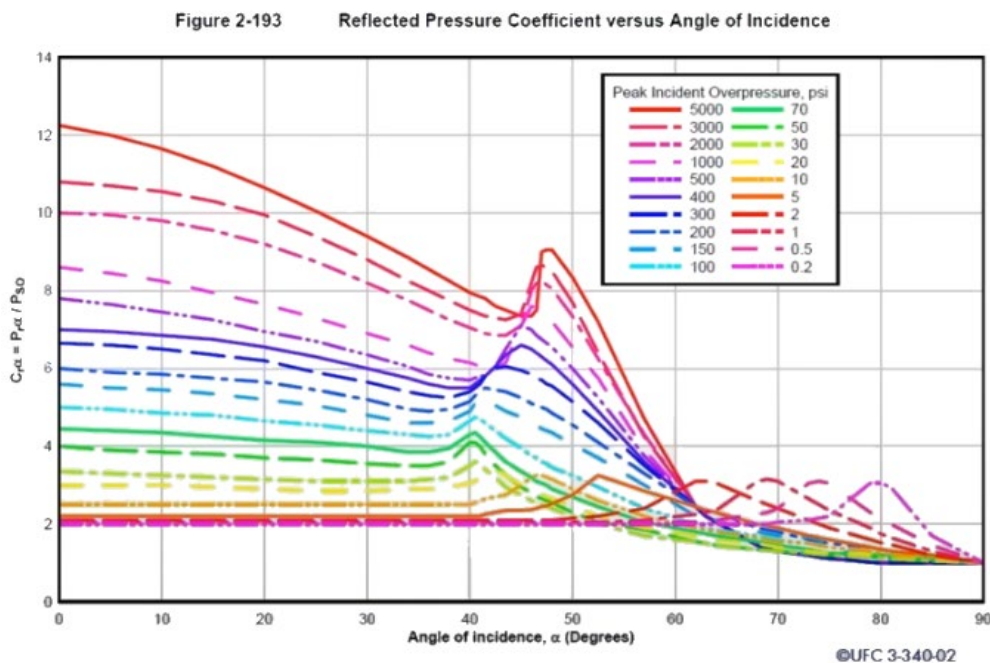


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнта відбитого тиску від кута відбиття у замкнутому просторі $C_r = f(\alpha)$ (цифри поруч із кривими вказують на піковий аварійний тиск P_{so} , psi)

Fig. 3. Graphs for the dependence of the reflected pressure coefficient on the reflection angle in a closed space $C_r = f(\alpha)$ (the numbers next to the curves indicate the peak emergency pressure P_{so} , psi)

Спрощений графік зміни тиску вибуху у часі. Для виконання розрахунку ідеалізований графік зміни тиску вибуху у часі (рис.

1), наведений вище, було спрощено до трикутного розподілу з миттєвим зростанням та лінійним спадом у позитивній фазі (рис. 4).

Важливо щоб значення пікового тиску та імпульсу збереглися (імпульс – це область під кривою). Тож умовний проміжок часу знаходимо за формулою:

$$t_e = 2(I/P)$$

Для спрощення розрахунків простих конструкцій негативна фаза часто ігнорується, оскільки її внесок у розрахунок на вплив вибухової хвилі є незначним. Але врахування

негативної фази вибухової хвилі в розрахунках допомагає забезпечити більш точні та надійні результати, що сприяє створенню безпечних і стійких конструкцій. Наприклад, не варто нехтувати негативною фазою при розрахунку конструкцій, чутливих до знакозмінних навантажень, оскільки вона створює зворотні навантаження, які можуть бути критичними для таких конструкцій.

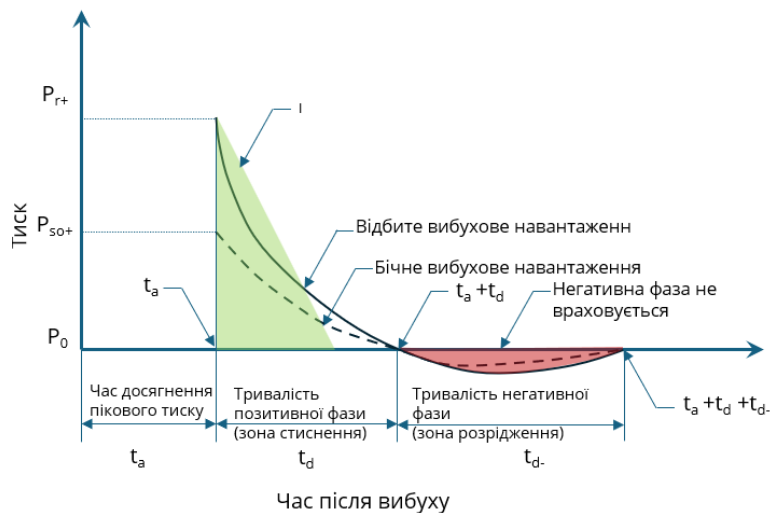


Рис. 4. Спрощений графік зміни тиску під час вибуху
Fig. 4. Simplified graph: change of pressure during an explosion

Також при розрахунку будівельних конструкцій на дію вибуху часто ігноруються такі додаткові фактори як: сила опору через вітер або динамічний тиск (вітрове навантаження, яке виникає одночасно з вибуховою хвилею, може збільшити загальний тиск на конструкцію, особливо на її вертикальні елементи); екранування прилеглої будівлі (зменшення навантаження); відбиття (збільшення навантаження); внутрішнє навантаження через проникнення вибухової хвилі всередину приміщення через великі отвори.

Попередня оцінка вибухостійкості однопверхової будівлі в ЛІРА-САПР. На основі прикладу 2.1. наведеного в AISC Design Guide 26 [17] продемонструємо особливості моделювання вибухового навантаження за допомогою програмного комплексу ЛІРА-FEM (ЛІРА-САПР). У прикладі наведено однопверхову будівлю (ширина 50 футів, довжина 70 футів, висота 15 фу-

тів). Колони, ригелі та прогони змодельовано в ЛІРА-FEM стержневими скінченними елементами, яким призначені сталеві типи жорсткості: стійки колон - двотавровий переріз НВВ300, ригелі - двотавровий переріз ІРЕ450, проміжні ригелі та прогони - прямокутна труба РК100Х5.0. Стінові панелі та покриття змодельовані плоскими скінченними елементами оболонки.

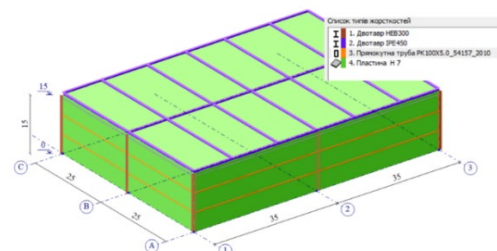


Рис. 5. Розрахункова схема однопверхової будівлі

Fig. 5. Design model of a one-storey building

Вибух відбувається на відстані $R=50$ футів. Еквівалентна вага заряду в тротиловому еквіваленті становить 500 фунтів. На основі цих даних розраховується масштабована відстань Z :

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} = \frac{50 \text{ ft}}{\sqrt[3]{500 \text{ lb}}} = 6.3 \frac{\text{ft}}{\text{lb}^{1/3}}$$

де

R - відстань від заряду до розрахункової точки;

W - вага еквівалентного навантаження у тротиловому еквіваленті.

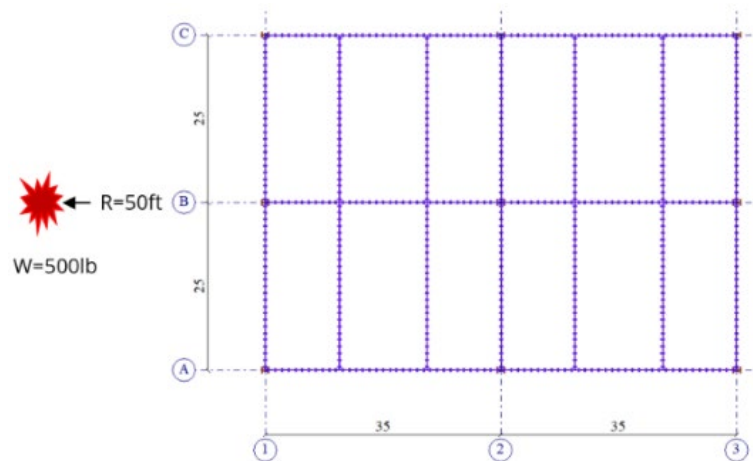


Рис. 6. Вибух на відстані $R=50$ футів, вага заряду $W=500$ фунтів

Fig. 6. Explosion at a distance of $R=50$ ft, charge weight $W=500$ lb

Фасадна стіна (стіна, повернена до вибуху). Були проведені обширні дослідження, спрямовані на вивчення взаємозв'язку між величиною заряду, відстанню до об'єкту та параметрами вибуху, які задані на графіку тиск-час [20-24]. У технічних посібниках, наприклад UFC [25], містяться пара-

метри ударної хвилі у вигляді функції масштабованої відстані, у формі емпіричних параметричних кривих вибуху.

За допомогою масштабованої відстані, по рисунку 7 можна безпосередньо визначити параметри позитивної фази вибухової хвилі, перелічені нижче в таблиці 1, для відбитого та бічного тиску..

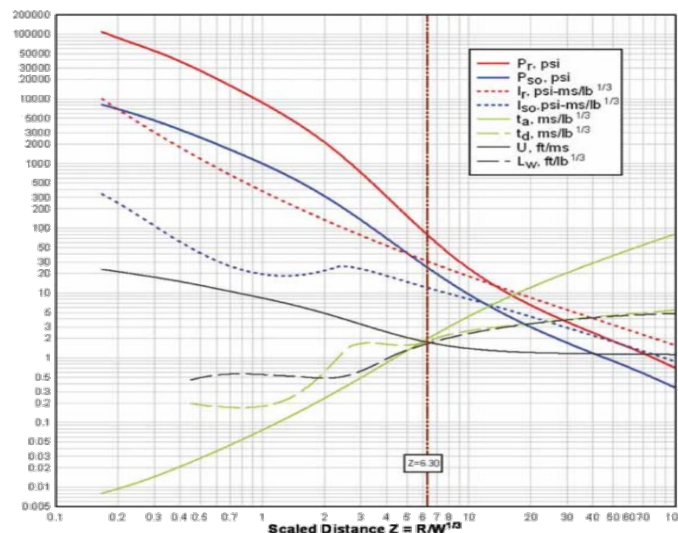


Рис.7. Параметри позитивної фази для поверхневих вибухів тротилу (DOD, 2008).

Fig. 7. Positive phase parameters for the surface trotyl explosions (DOD, 2008).

Табл. 1 Параметри вибухового навантаження (фасадна стіна)**Table. 1** Blast loading parameter (front wall)

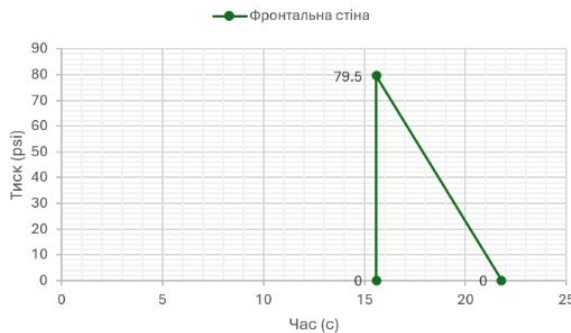
Параметри вибухового навантаження	Відповідно рисунку 7 [25]	Розрахункове значення
відбитий піковий тиск (+)	$P_r = 79,5$ фунт/кв. дюйм	-
бічний піковий тиск (+)	$P_{so} = 24,9$ фунт/кв. дюйм	-
відбитий імпульс (+)	$I_r = 31 W^{1/3}$	$I_r = 246$ фунт/кв. дюйм*мс
бічний імпульс (+)	$I_{so} = 12.1 W^{1/3}$	$I_{so} = 96$ фунт/кв. дюйм*мс
час наближення вибухової хвилі	$t_a = 1.96 W^{1/3}$	$t_a = 15,6$ мс
тривалість експоненційного навантаження (+)	$t_d = 1.77 W^{1/3}$	$t_d = 14,0$ мс
швидкість фронту ударної хвилі	$U = 1,75$ фут/мс	-

Оскільки фасадна стіна повернута безпосередньо до епіцентру вибуху, то до цієї поверхні прикладається «відбивні» змінні з таблиці 1.

Спрощений підхід з використанням трикутника вимагає, щоб відповідна тривалість

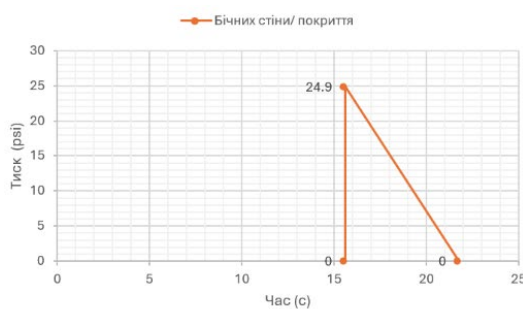
була розрахована таким чином, щоб забезпечити збереження імпульсу (площу під кривою) протягом позитивної фази.

$$t_{e,r} = 2I_r / P_r = 2(246 \text{ фунт/кв.дюйм мс}) / 79,5 \text{ фунт/кв.дюйм} = 6,19 \text{ мс}$$

**Рис.8.** Графік залежності тиску від часу для стіни, поверненої до вибуху**Fig. 8.** Graph for dependence of pressure on time for the wall facing the explosion

Бічні стіни та покриття. Для спрощення задачі масштабована відстань Z , яка була розрахована для фасадної стіни, застосована для визначення змінних вибуху біля бічних стін та покриття будівлі. Тому для визначення параметрів тимчасового графіку ти-

ску для бічних стін та покриття будівлі використовуються бічні значення таблиці 1. Можна провести більш детальний розрахунок, щоб врахувати зменшення сили ударної хвилі в залежності від відстані від місця вибуху до бічної стіни і покриття.

**Рис.9.** Графік залежності тиску від часу для бічних стін та покриття**Fig. 9.** Graph for dependence of pressure on time for side walls and roofs

Еквівалентна тривалість t_e розраховується за допомогою "бічних" змінних.

$$t_{e,so} = 2I_{so} / P_{so} = 2(96,0 \text{ фунт/кв.дюйм мс}) / 24,9 \text{ фунт/кв.дюйм} = 7,71 \text{ мс}$$

Тильна стіна. Масштабована відстань Z для тильної стіни змінена з урахуванням довжини будівлі. Тепер відстань дорівнює $50 \text{ футів} + 70 \text{ футів}$, що становить 120 футів .

Отже, Z визначається за такою формулою.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} = \frac{120 \text{ ft}}{\sqrt[3]{500 \text{ lb}}} = 15.1 \frac{\text{ft}}{\text{lb}^{1/3}}$$

де R - відстань від елемента до навантаження;

W - вага еквівалентного навантаження у тротиловому еквіваленті.

Рисунок 7 можна використовувати для знаходження параметрів позитивної фази вибухової хвилі, перелічених у таблиці 2 для бічного тиску.

Табл. 2 Параметри вибухового навантаження (тильна стіна)

Table. 2 Blast loading parameter (rear wall)

Параметри вибухового навантаження	Відповідно рисунку 7 [25]	Розрахункове значення
бічний піковий тиск (+)	$P_{so} = 4,60 \text{ фунт/кв.дюйм}$	-
бічний імпульс (+)	$I_{so} = 5.54W^{1/3}$	$I_{so} = 44.0 \text{ фунт/кв.дюйм*мс}$
час наближення вибухової хвилі	$t_a = 8.32W^{1/3}$	$t_a = 66.0 \text{ мс}$
тривалість експоненційного навантаження (+)	$t_d = 3.11W^{1/3}$	$t_d = 24.7 \text{ мс}$
швидкість фронту ударної хвилі	$U = 1,26 \text{ фут/мс}$	-

Еквівалентну тривалість t_e для тильної стіни можна розрахувати за допомогою відповідних змінних, згаданих вище.

$$t_{e,so} = 2I_{so} / P_{so} = 2(44,0 \text{ фунт/кв.дюйм мс}) / 4,60 \text{ фунт/кв.дюйм} = 19,1 \text{ мс}$$

Оскільки висота тильної стіни становить 15 футів над рівнем землі, на якому відбувається вибух, миттєвого підвищення тиску

не відбувається. Замість цього для розрахунку часу досягнення пікового тиску t_2 використовується швидкість вибухової хвилі, висота задньої стінки та час прибуття вибухової хвилі.

$$t_2 = L_1 / U + t_a = 15,0 \text{ фути} / 1,26 \text{ фути/мс} + 66,0 \text{ мс} = 77,9 \text{ мс}$$

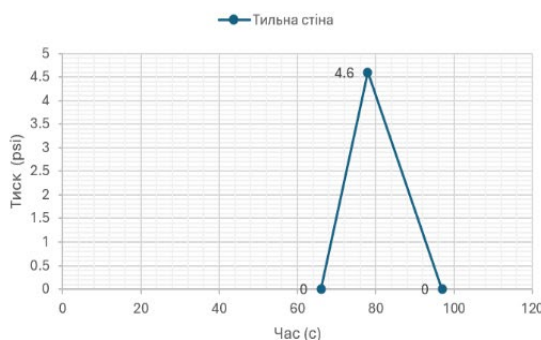


Рис.10. Графік залежності тиску від часу для тильної стіни
Fig. 10. Graph for dependence of pressure on time for rear wall

Тепер ми можемо знайти час закінчення вибухового навантаження t_f .

$$t_f = t_2 + t_{e,so} = 77,9 \text{ мс} + 19,1 \text{ мс} = 97,0 \text{ мс}$$

Якщо об'єднати всі змінні, розраховані вище для тильної стіни, то графік тиск-час для цього розрізу будівлі буде завершено.

Підсумок розрахунку навантаження від повітряної ударної хвилі.

Навантаження на фасадні, бічні, тильні стіни та покриття можуть бути співставлені таким чином, щоб відобразити залежність загального тиску від часу та показати, як дія повітряної ударної хвилі вплине на різні частини конструкції з плином часу (рис. 11).

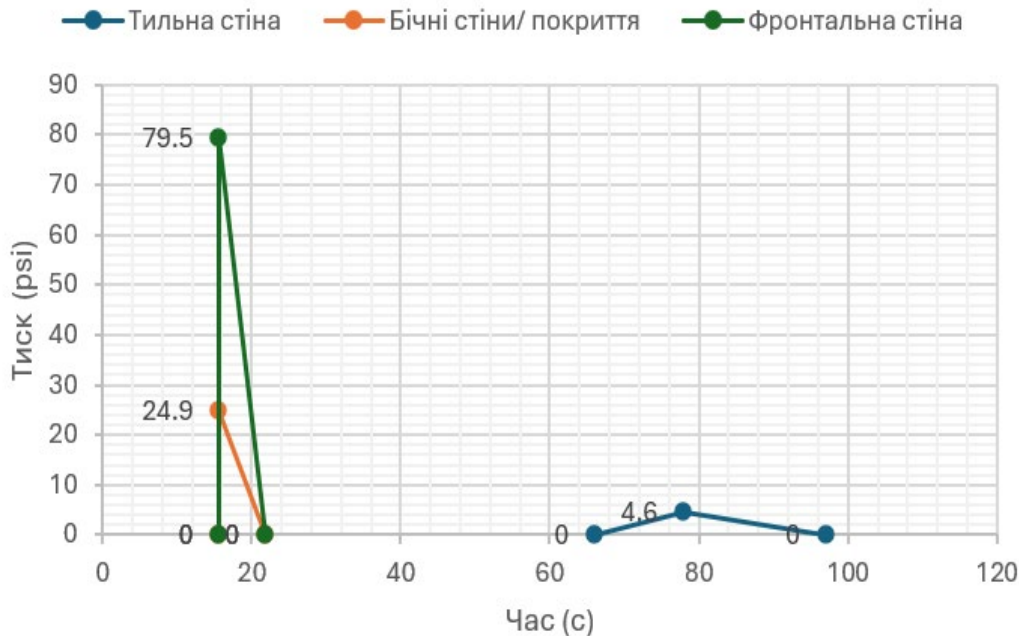


Рис. 11 Комбінований графік залежності тиску від часу
Fig. 11. Combined graph for dependence of pressure on time

Цю інформацію можна задати в ЛІРА-FEM (ЛІРА-САПР) в додатковому модулі “Динаміка у часі”. Ваги мас отримані за допомогою перетворень зі статичних навантажень.

Динамічне навантаження, яке діє на конструкцію, можна задати за допомогою задання загального закону зміни динамічного навантаження протягом часу. Для цього прикладемо статичне рівномірно розподілене по площі навантаження

нормально до поверхні фронтальної, бічних і тильної стін, а також покриття, і перетворимо його на динамічне.

Для перетворення дії ударної хвилі в динамічне навантаження задаються відповідні графіки зміни тиску в часі (рис. 12-14). Величини навантаження з цього графіка будуть автоматично множитися на число яке задається як інтенсивність статичного навантаження, в нашому випадку - на 1 psi (фунт/дюйм²).

Результати динамічного розрахунку показують, що максимальні переміщення каркасу будівлі складають 1,5 см вздовж осі X та 0,5 см вздовж осі Y, що є менше за максимальне горизонтальне відхилення, яке дорівнює $H/25$ [11] (18,28 см).

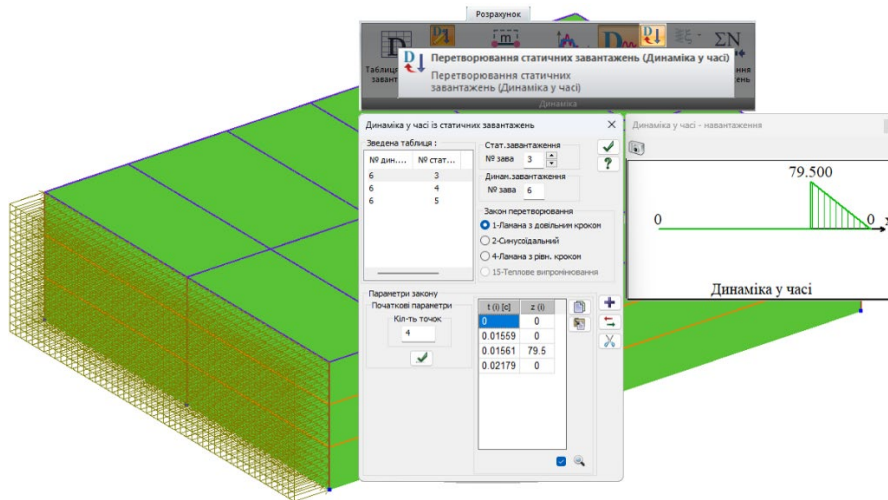


Рис. 12. Перетворення статичного завантаження 3 в динамічне завантаження 6
Fig. 12. Converting a static load case 3 to a dynamic load case 6

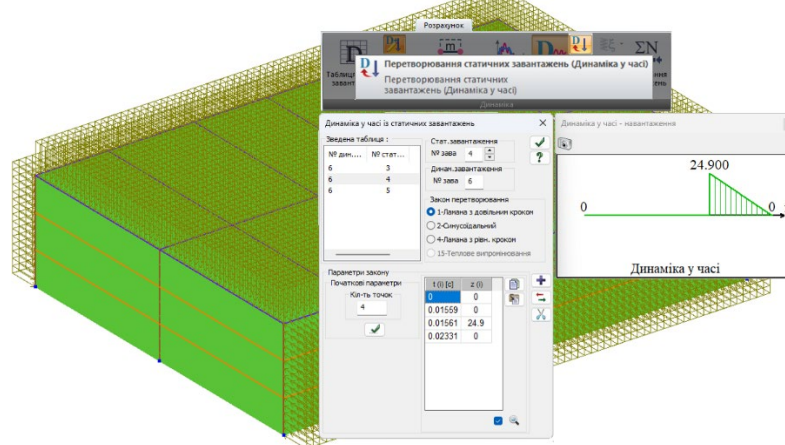


Рис. 13. Перетворення статичного завантаження 4 в динамічне завантаження 6
Fig. 13. Converting a static load case 4 to a dynamic load case 6

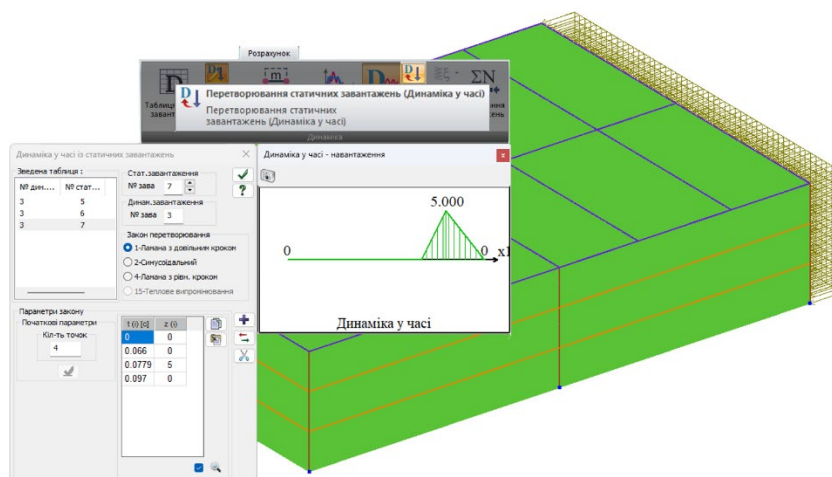


Рис. 14. Перетворення статичного завантаження 5 в динамічне завантаження 6
Fig. 14. Converting a static load case 5 to a dynamic load case 6

Однак найбільші переміщення спостерігаються в огорожувальних конструкціях,

де вони досягають 4 метрів, що свідчить про їхню можливу руйнацію.

Огинаюча максимальних за абсолютною величиною значень
Мозаїка переміщень по X(G)
Одиниці виміру - см

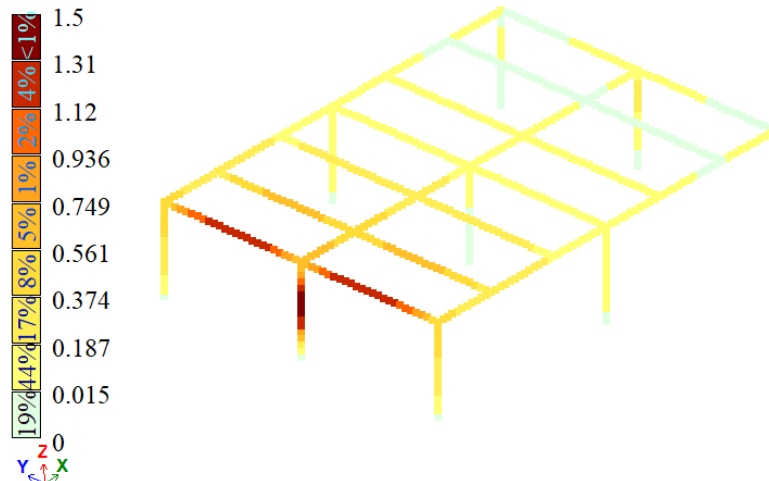


Рис. 15. Мозаїка переміщень вздовж осі X, м
Fig. 15. Mosaic plot of displacements along the X-axis, m

Огинаюча максимальних за абсолютною величиною значень
Мозаїка переміщень по Y(G)
Одиниці виміру - см

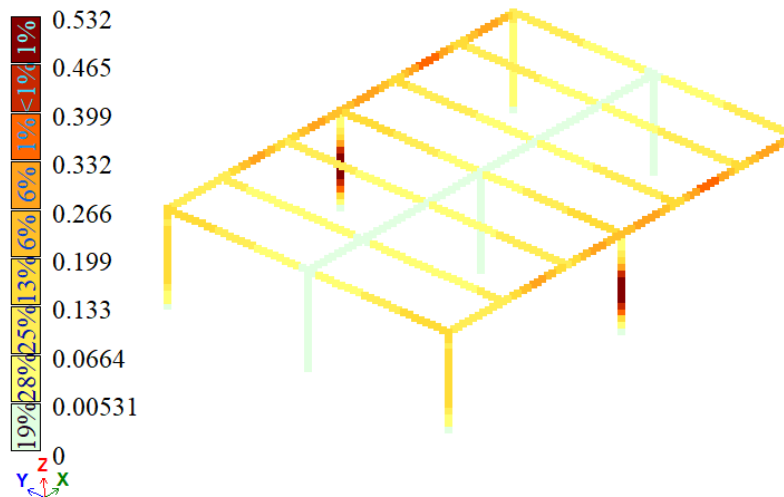


Рис. 16. Мозаїка переміщень вздовж осі Y, м
Fig. 16. Mosaic plot of displacements along the Y-axis, m

Висновок. Таким чином, використовуючи спрощений графік зміни тиску вибуху в часі та метод прямого динамічного інтегрування, можливо здійснити розрахунок впливу повітряної ударної хвилі на конструкцію за допомогою методу скінченних елементів. Це дозволяє враховувати фізичну та геометричну нелінійність, демпфування, різні варіанти конструкцій та інші можливості програмного комплексу ЛІРА-САПР. Цей аналіз допомагає в оцінці ризиків при проектуванні захисних структур, СПП, розробці

проектних рішень та проведенні досліджень у сфері вибухобезпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Левчук К. О., Романюк Р. Я., Толок А. О. Цивільний захист: навч. посіб. / К. О. Левчук, Р. Я. Романюк, А. О. Толок — «ДДТУ», 2016 — 325 с.
2. Євдін О. М., Могильниченко В. В., Скидан М. А. Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій. Т. 1. "Техногенна та

- природна небезпека” / О. М. Євдін, В. В. Могильниченко, М. А. Скидан [та ін.]. — К. : КІМ, 2007. — 636 с.
3. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. — Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2017. — 39 с.
 4. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту — [Введений у дію з 01-11-2023]. — К.: Мінрегіон України, 2023. — 112 с.
 5. European Standard EN 1991-1-7 (Єврокод 1 "Дія на конструкції. Частина 1-7: Зовнішні впливи. Вибухи")
 6. American Society of Civil Engineers (ASCE): ASCE/SEI 59-11 "Blast Protection of Buildings".
 7. Барабаш М. С. Комп'ютерне моделювання процесів життєвого циклу об'єктів будівництва: Монографія. — К.: Вид-во «Сталь», 2014. — 301 с.
 8. Varabash M.S., Kostyra N.O., Pysarevskiy V.Y. Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. № 708. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044>
 9. Барабаш М.С., Костира Н.О., Томашевський А.В. Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несучих конструкцій інструментами ПК «ЛІРА-САПР» // *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1(007). С. 7-14. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PSACEA.2312.220222.7.827>
 10. Максименко В.П., Барабаш М.С., Писаревський Б.Ю. Методика оцінки напружено-деформованого стану конструкцій будівлі на основі методу підсистем // *Науково техн. журнал «Будівельне виробництво»*. 2021. № 71. 7.
 11. Varabash M., Pisarevskiy V., Bashinsky Ya. Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program). // *Civil and Environmental Engineering*, 2020. № 16 (1). P. 63-70
 12. Пікуль А.В., Барабаш М.С. Проблеми моделювання динамічних впливів. Реалізація в ПК ЛІРА-САПР // *Збірка тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю з дня народження професора В.К. Єзунова “Проблеми теорії і практики сейсмостійкого будівництва”* - Одеса: ОДАБА, 2016. — 124 с.
 13. Барабаш М.С., Гензерський Ю.В., Писаревський Б.Ю. Чисельне моделювання динамічних впливів у ПК ЛІРА-САПР // *Сучасні методи і проблемно орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій. Їх застосування у проектуванні і навчальному процесі: тези доп. 3-ї міжн. наук.-практ. конференції*. Київ, 2019. С. 6–9.
 14. Максименко, В., Барабаш, М., Костира, Н., Бармен, І. Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ЛІРА-САПР (2024). // *Наука та будівництво*, 38(4). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>
 15. Ромашкіна М. А. Чисельне дослідження напружено-деформованого стану цегляної житлової будівлі при запроектному впливі (вибух побутового газу всередині приміщення) / М. А. Ромашкіна // *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування* // *Зб. наук. праць – Д.: ГВУЗ ПГАСА, 2015. – С. 28-37.*
 16. Ромашкіна М. А. Визначення ймовірності вибуху газоповітряної суміші в газифікованій квартирі / М.А. Ромашкіна // *Науково-технічний збірник: Проблеми розвитку міського середовища*. — К.: НАУ, 2026 - №2 (16) — С.157-167.
 17. Koliakova, V., Dumych, A., & Sumak, A. (2024, January). Stress-strain state of shelter structures under the action of air shock wave. In *Sworld-Us Conference proceedings (No. usc22-01, pp. 49-56)*.
 18. Шимановський О. В. Особливості вибухових навантажень та практичні прийоми захисту будівель від вибуху / О. В. Шимановський // *Промислове будівництво та інженерні споруди*. — 2019. — № 4. — С. 28–32.
 19. Шимановський О. В. Особливості забезпечення будівель та інженерних споруд при терористичних нападах / О. В. Шимановський // *Промислове будівництво та інженерні споруди*. — 2018. — № 4. — С. 2–11
 20. U.S. Department of the Army, the Navy and Air Force. The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions-Technical Manual (TM 5-1300); U.S. Department of the Army: Washington, DC, USA, 1990.
 21. U.S. Department of Defense (DOD). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02); DOD: Washington, DC, USA, 2008.

22. Cormie, D.; Mays, G.; Smith, P.D. Blast Effects on Buildings, 2nd ed.; Thomas Telford: London, UK, 2009.
23. Baker, W.E.; Cox, P.A.; Westine, P.S.; Kulesz, J.J.; Strehlow, R.A. *Explosion Hazards and Evaluation*; Elsevier Scientific: New York, NY, USA, 1983
24. Newmark, N.M.; Hansen, R.J. Design of blast resistant structures. *Shock. Vib. Handb.* 1961, 3, 04014007.
25. **USA Department of Defense (DoD), unified facilities criteria (UFC) 3-340-02:** Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, 2008

REFERENCES

1. **Levchuk K. O., Romaniuk R. Ya., Tolok A. O.** Tsyvilnyi zakhyst: navch. posib. / K. O. Levchuk, R. Ya. Romaniuk, A. O. Tolok — «DDTU», 2016 — 325 s.
2. **Yevdin O. M., Mohylnychenko V. V., Skydan M. A.** Zakhyst naseleння i terytorii vid nadzvychnykh sytuatsii. T. 1. "Tekhnohenna na pryrodna nebezpeka" / O. M. Yevdin, V. V. Mohylnychenko, M. A. Skydan [ta in.]. — K. : KIM, 2007. — 636 s.
3. **DBN V.1.1-7:2016.** Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy. — Kyiv: Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, 2017. — 39s.
4. **DBN V.2.2-5:2023.** Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu — [Vvedenyi u diiu z 01-11-2023].— K.: Minrehion Ukrainy, 2023. — 112 s.
5. **European Standard EN 1991-1-7** (Ievrokod 1 "Diia na konstruktsii. Chastyna 1-7: Zovnishni vplyvy. Vybukhy")
6. **American Society of Civil Engineers (ASCE):** ASCE/SEI 59-11 "Blast Protection of Buildings".
7. **Barabash M. S.** Kompiuterne modeliuвання protsesiv zhyttievoho tsykladu ob'ektiv budivnytstva: Monohrafiia. — K.: Vyd-vo «Stal», 2014. — 301 s.
8. **Barabash M.S., Kostyra N.O., Pysarevskiy B.Y.** Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. № 708. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044>
9. **Barabash M.S., Kostyra N.O., Tomashevskiy A.V.** Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu ta mitsnosti poshkodzhennykh nesuchykh konstruktsii instrumentamy PK «LIRA-SAPR» // *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*. 2022. № 1(007). S. 7-14.
10. **Maksymenko V.P., Barabash M.S., Pysarevskiy B.Iu.** Metodyka otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu konstruktsii budivli na osnovi metodu pidsystem // *Naukovo tekhn. zhurnal «Budivne vyrobnytstvo»*. 2021. № 71. 7.
11. **Barabash M., Pisarevskiy B., Bashinsky Ya.** Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program). // *Civil and Environmental Engineering*, 2020. № 16 (1). P. 63-70
12. **Pikul A.V., Barabash M.S.** Problemy modeliuвання dynamichnykh vplyviv. Realizatsiia v PK LIRA-SAPR // *Zbirka tez dopovidei mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, prysviachenoї 90-richchiu z dnia narodzhennia profesora V.K. Yehupova "Problemy teorii i praktyky seismostiikoho budivnytstva"* - Odesa: ODABA, 2016. — 124 s.
13. **Barabash M.S., Henzerskyi Yu.V., Pisarevskiy B.Iu.** Chyselne modeliuвання dynamichnykh vplyviv u PK LIRA-SAPR // *Suchasni metody i problemno oriientovani kompleksy rozrakhunku konstruktsii. Yikh zastosuvannia u proektuvanni i navchalnomu protsesi: tezy dop. 3-yi mizhn. nauk.-prakt. konferentsii*. Kyiv, 2019. S. 6 – 9.
14. **Maksymenko, V., Barabash, M., Kostyra, N., Barmen, I.** Modeliuвання dynamichnykh navantazhen vybukhovoho typu v zadakhakh doslidzhennia mitsnosti budivnykh konstruktsii z vykorystanniam PK LIRA-SAPR (2024). // *Nauka ta budivnytstvo*, 38(4). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-3>
15. **Romashkina M. A.** Chyselne doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu tshlianoi zhytlovoi budivli pry zaproektnomu vplyvi (vybukh pobutovoho hazu vsередyni prymishchenia) / M. A. Romashkina // *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannia* // *Zb. nauk. prats – D.: HVUZ PHASA*, 2015. — S. 28-37.
16. **Romashkina M. A.** Vyznachennia ymovirnosti vybukhu hazopovitrianoi sumishi v hazyfikovanii kvartyri / M.A. Romashkina // *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk: Problemy rozvytku miskoho seredovyscha*. — K.:NAU, 2026 - №2 (16) — S.157-167.
17. **Koliakova, V., Dumych, A., & Sumak, A. (2024, January).** Stress-strain state of shelter structures under the action of air shock wave. *In*

Sworld-Us Conference proceedings (No. usc22-01, pp. 49-56).

18. **Shymanovskiy O. V.** Osoblyvosti vybukhovyykh navantazhen ta praktychni pryomy zakhystu budivel vid vybukhu / O. V. Shymanovskiy // *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy.* – 2019. – № 4. – S. 28–32.
19. **Shymanovskiy O. V.** Osoblyvosti ubezpechenia budivel ta inzhenernykh sporud pry terorystychnykh napadakh / O. V. Shymanovskiy // *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy.* – 2018. – № 4. – S. 2–11
20. **U.S. Department of the Army, the Navy and Air Force.** The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions-Technical Manual (TM 5-1300); *U.S. Department of the Army: Washington, DC, USA, 1990.*
21. **U.S. Department of Defense (DOD).** Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02); *DOD: Washington, DC, USA, 2008.*
22. **Cormie, D.; Mays, G.; Smith, P.D.** Blast Effects on Buildings, *2nd ed.*; *Thomas Telford: London, UK, 2009.*
23. **Baker, W.E.; Cox, P.A.; Westine, P.S.; Kulesz, J.J.; Strehlow, R.A.** *Explosion Hazards and Evaluation; Elsevier Scientific: New York, NY, USA, 1983*
24. **Newmark, N.M.; Hansen, R.J.** Design of blast resistant structures. *Shock. Vib. Handb. 1961, 3, 04014007.*
25. **USA Department of Defense (DoD), unified facilities criteria (UFC) 3-340-02:** Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, 2008

ANALYSIS OF THE BUILDING ON THE AIR SHOCK WAVE BY DIRECT DYNAMIC METHOD (WITH LIRA-FEM SOFTWARE)

*Maryna ROMASHKINA,
Bohdan PISAREVSKYI,
Olekii ZHURAVLYOV*

Calculation of the impact of air shock waves on buildings is extremely important for our country, which is in a state of war. Studying the structural safety and survivability of load-bearing reinforced concrete structures under influence is an important task, especially for critical infrastructure facilities. A blast scenario can be carried out directly in an FEA program as a time history analysis evaluate varying levels of structural damage and to minimize loss of life.

The article is devoted to the features of the calculation of buildings under the influence of air shock waves using the finite element method using the LIRA-FEM software complex. The features of explosive loads, typical shock wave parameters, and the order of analysis for explosive loads are taken into consideration. The primary distinctions between shock or explosion impacts and regular loads are explained. In-depth consideration is given to the problems of determining shock wave parameters and how they affect structures. Also included are the techniques for evaluating structures for explosive impacts.

Using LIRA-FEM software, a preliminary analysis of the explosion resistance of a one-story building with a metal frame and sheet metal wall infill is carried out. It is demonstrated how to define impulse loads from a shock wave to the side walls, roofs, rear walls, and walls facing the explosion. The article describes the peculiarities of the "Time History Analysis" system in the LIRA-FEM program for explosion dynamics problems.

This analysis helps in the assessment of risks in the design of protective structures, development of project solutions and conducting research in the field of explosion safety.

Keywords: emergency explosive impact; survivability; air shock wave; reflection pressure; burst pressure; build-up pressure; streamline pressure; compression zone; rarefaction zone; nonlinear calculation; finite element method; finite element analysis (FEA); LIRA-FEM software.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024