

DOI: 10.32347/2786-7269.2026.16.243-254

УДК 624.042.8

к.т.н., доцент **Банах А.В.**,  
av\_banakh@znu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0517-2157,  
**Гребенюк І.В.**,  
saliongsx@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-4721-2505,  
**Гребенюк О.В.**,  
gsxgev@meta.ua, ORCID: 0000-0002-0123-6803,  
**Мешков К.В.**,  
meshkov\_kv@ukr.net, ORCID: 0009-0008-9314-6522,  
Запорізький національний університет

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОВІТРЯНИХ УДАРНИХ ХВИЛЬ ВІД ВИБУХІВ НА БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

*Визначені особливості впливу повітряних ударних хвиль на об'єкти міської забудови, а також сукупна дія негативних факторів вибухових впливів. Доведена необхідність врахування ґрунтових основ при моделюванні динамічних впливів від вибухів на будівлі та споруди. Розглянуто особливості передачі динамічних навантажень через ґрунтові основи. Наведені дані реальних повітряних вибухів, зафіксованих програмною системою реєстрації землетрусів для отримання вихідних даних щодо параметрів сейсмічних та вибухових впливів. За результатами розрахунків проведений аналіз можливих механізмів передачі динамічних реакцій ґрунтових основ при повітряних вибухових впливах на будівлі та споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Показані принципи та алгоритм визначення розмірів фрагменту ґрунтової основи для моделювання взаємодії системи «будівля (споруда) – ґрунтова основа».*

*Ключові слова: вибухові впливи; технічний стан; складні інженерно-геологічні умови; статико-динамічна розрахункова модель; динамічні реакції*

**Постановка проблеми.** Проблема моніторингу технічного стану будівель і споруд, які підпали під дію вибухових впливів, стане нагальною задачею у післявоєнний період при відбудові інфраструктури населених пунктів, які постраждали від збройної агресії. Багато об'єктів міської забудови мають приховані дефекти в результаті вибухових впливів, які можуть суттєво вплинути на їхню несучу здатність та експлуатаційний ресурс. Оцінка витрат на відновлення експлуатаційного ресурсу таких будівель і споруд є принциповою при визначенні загальної шкоди, яка буде повернута Україні у вигляді репарацій.

Сукупна дія негативних факторів вибухових впливів характеризується швидким виділенням великої кількості енергії. Одним з основних і найбільш руйнівних факторів, що завдає шкоди будівлям і спорудам, є ударна хвиля. В даному випадку мова йде про хвилю стиснення середовища, а саме повітря, що поширюється із надзвуковою швидкістю і має потужний динамічний (імпульсний) вплив. Оскільки потужність вибуху, відстань до об'єкту та напрями дії заздалегідь невідомі, виникають складності моделювання впливу ударної хвилі від вибухів на об'єкти забудови. Оцінка впливу вибухів на такі об'єкти можлива за наявності інформації про координати місць вибухів та їхню потужність.

Однією з нагальних задач на тепер та на період відбудови у післявоєнний період буде обстеження технічного стану будівель і споруд, які отримали пошкодження в результаті бойових дій, а також були під впливом вибухових навантажень, які суттєво впливають на несучу здатність конструкцій та експлуатаційний ресурс таких об'єктів.

Це буде потребувати визначення зони враження кожного вибуху, який відбувся поблизу забудови. Вплив вибухів аналогічний впливу сейсміки, причому вибух 450 – 800 кг тротилу (крилаті та балістичні ракети) викликає сейсмічні хвилі, еквівалентні в радіусі 250 м землетрусу інтенсивністю 6-8 балів. Найгірша ситуація, коли такі вибухи відбуваються не один раз і виникає накопичувальний ефект, коли можна говорити про скорочення терміну експлуатації таких будівель [1].

Особливості вибухових навантажень полягають у тому, що при наземних вибухах вплив на будівлі та споруди здійснюється як через повітряну вибухову хвилю, так і через ґрунтову основу, причому першою доходить саме вплив ґрунтової основи. У разі повітряного вибуху основним впливом буде, безумовно, повітряна вибухова хвиля, але через її взаємодію з конструкціями будівлі вплив передається через фундамент на ґрунтову основу, яка теж включиться в роботу системи. Тобто, вибухові впливи на будівлі та споруди слід розглядати комплексно, враховуючи як повітряні вибухові хвилі, так і вплив через ґрунтову основу. Причому ґрунт може виступати або як демпфер, або як підсилювач впливів, у залежності від своїх властивостей.

Таку задачу можна розділити, окремо визначивши впливи через повітря і ґрунтову основу. Впливу вибухів через ґрунтову основу була призначена перша публікація цього циклу [1]. Моделюванню механізмів передачі вибухових впливів через повітря на будівлі та споруди, що є актуальною задачею, яка дозволить визначити фактичний експлуатаційний ресурс об'єктів забудови, присвячена ця публікація.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження поведінки

ударної хвилі після вибуху, закономірності її розповсюдження в різних середовищах, вплив на конструкції будівель і споруд, принципи розподілу тиску, результати аналітичних досліджень та нормативні вимоги наведені в [2-5].

Моделюванню впливу динамічних навантажень, у тому числі ударних, присвячені роботи [6-8]. Дослідження засноване на принципах і моделях, апробованих в аналогічних розрахунках програмними комплексами, сертифікованими в Україні.

Питання встановлення бальності ударних повітряних хвиль, вибору методу розрахунку конструкцій на дії ударної хвилі, чисельного моделювання навантажень від вибухових хвиль на будівлі та споруди та прогнозування ризику руйнувань їх конструктивних елементів, а також розрахунки будівель на вплив дії повітряної ударної хвилі з використанням сучасних програмних комплексів, наведені в [9-13].

**Мета досліджень.** Метою цього дослідження є з'ясування механізму впливу від повітряних вибухових хвиль на будівлі та споруди з урахуванням попередніх деформацій для складних інженерно-геологічних умов, а також визначення остаточного експлуатаційного ресурсу будинків після вибухових впливів.

**Виклад основного матеріалу.** Для з'ясування механізму впливу моделюємо повітряну вибухову хвилю на систему «будівля – ґрунтова основа», представлена просторовою розрахунковою моделлю [1].

Для моделювання вибухових впливів скористаємося системою Raspberry Shake для фіксації в реальному часі вибухових впливів. Один з датчиків системи (унікальний номер RD834) розташований у м. Запоріжжя, що дає можливість моделювати динамічні впливи фактичними сейсмограмами [1].

В результаті ворожої атаки, яка сталася 01.02.2025 р., були зафіксовані сейсмограми повітряних вибухів. Датчик розташований в експлуатованій тривалий час (95 років) будівлі, яка була побудована на просідаючих ґрунтах без конструктивних заходів для запобігання просідання. Будівля має складну форму в плані, за конструктивною схемою частково безкаркасна, частково (в зоні розташування датчика) має внутрішні колони та несучі зовнішні стіни. Перекриття не жорстке, по сталевим балкам. Будівля неодноразово підпадала під дію деформацій просідання у зв'язку із замочуванням ґрунтової основи. На момент впливу вибухів, які відбулися на відстані 62 м від встановленого датчика, будівля перебувала в деформованому стані. При розрахунках враховувалися попередні деформації будівлі, накопичені за час попередньої експлуатації.

Приклади фіксації сейсмограм на трьох локаціях, прийняті для подальших розрахунків, наведені на рис. 1-2.

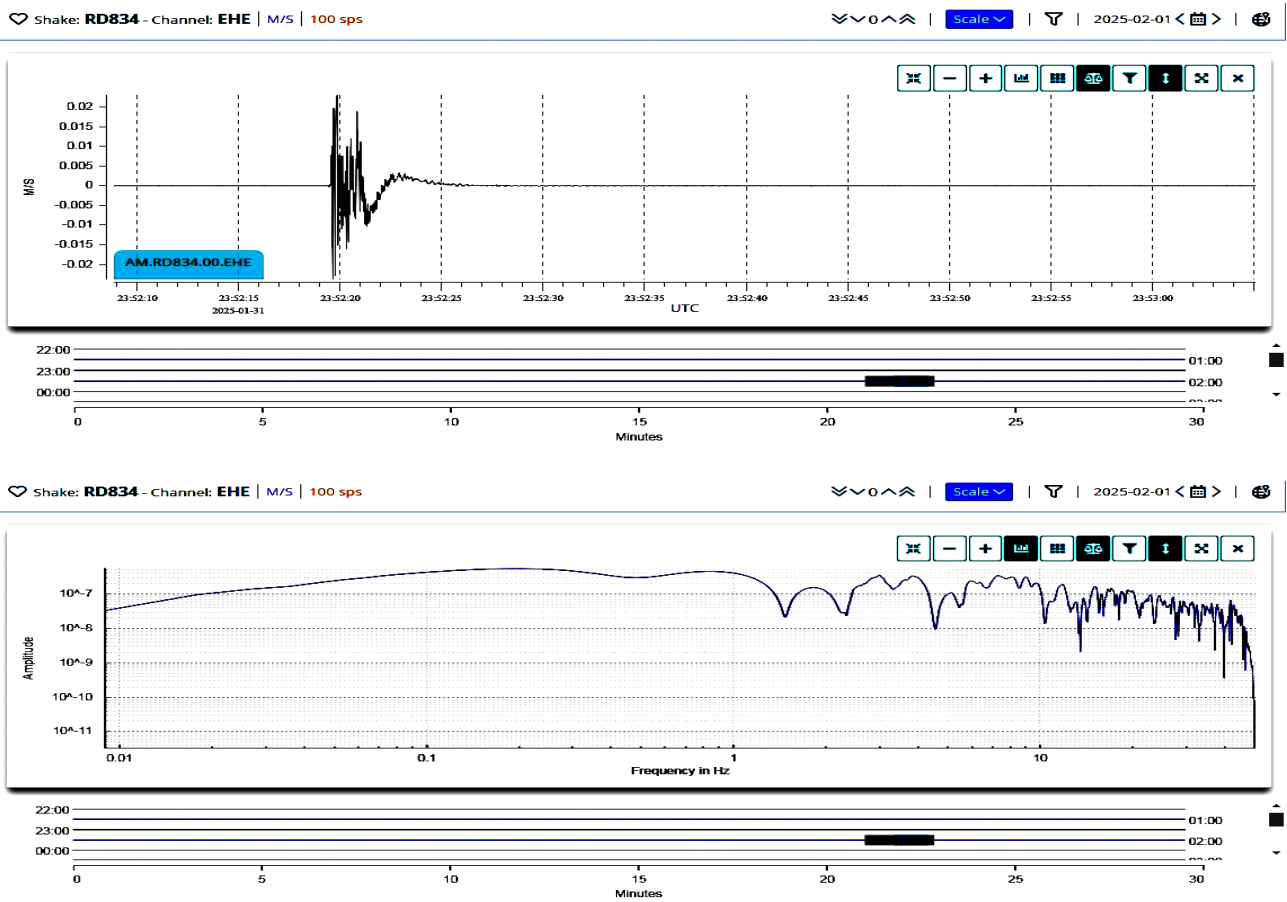
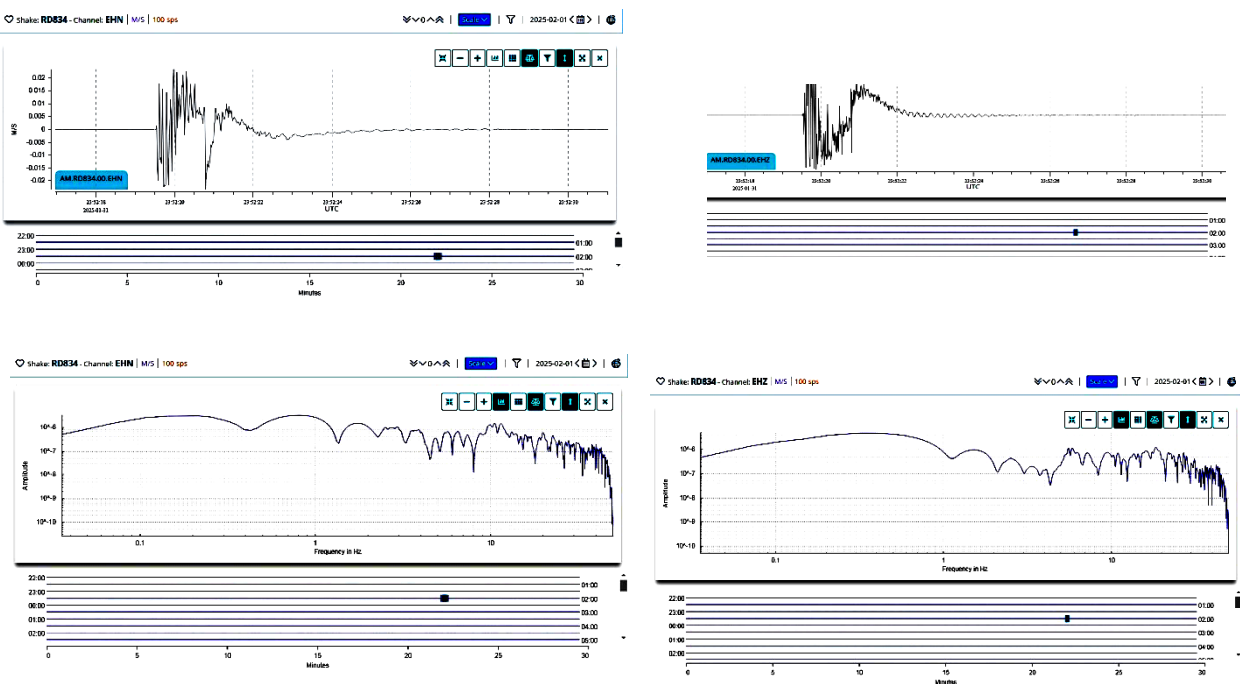


Рис. 1. Сейсмограма вибуху (локація 1)



а б  
Рис. 2. Сейсмограма вибуху: а) локація 2; б) локація 3.

Програмно також фіксуються параметри швидкості та амплітуди коливань в режимі реального часу.

Таким чином можна фіксувати можливі вторинні вибухові хвилі, бо такі ефекти суттєво знижують міцність конструктивних елементів будівель та їх необхідно враховувати при розрахунках.

Розрахунки виконувалися з використанням програмного комплексу ЛИРА-САПР 2016 R5. Задіяна розрахункова модель взаємодії експлуатованої будівлі з ґрунтовою основою, яка моделюється просторовими комплектами скінчених елементів [1]. Фрагмент такої статико-динамічної моделі наведений на рис. 3.

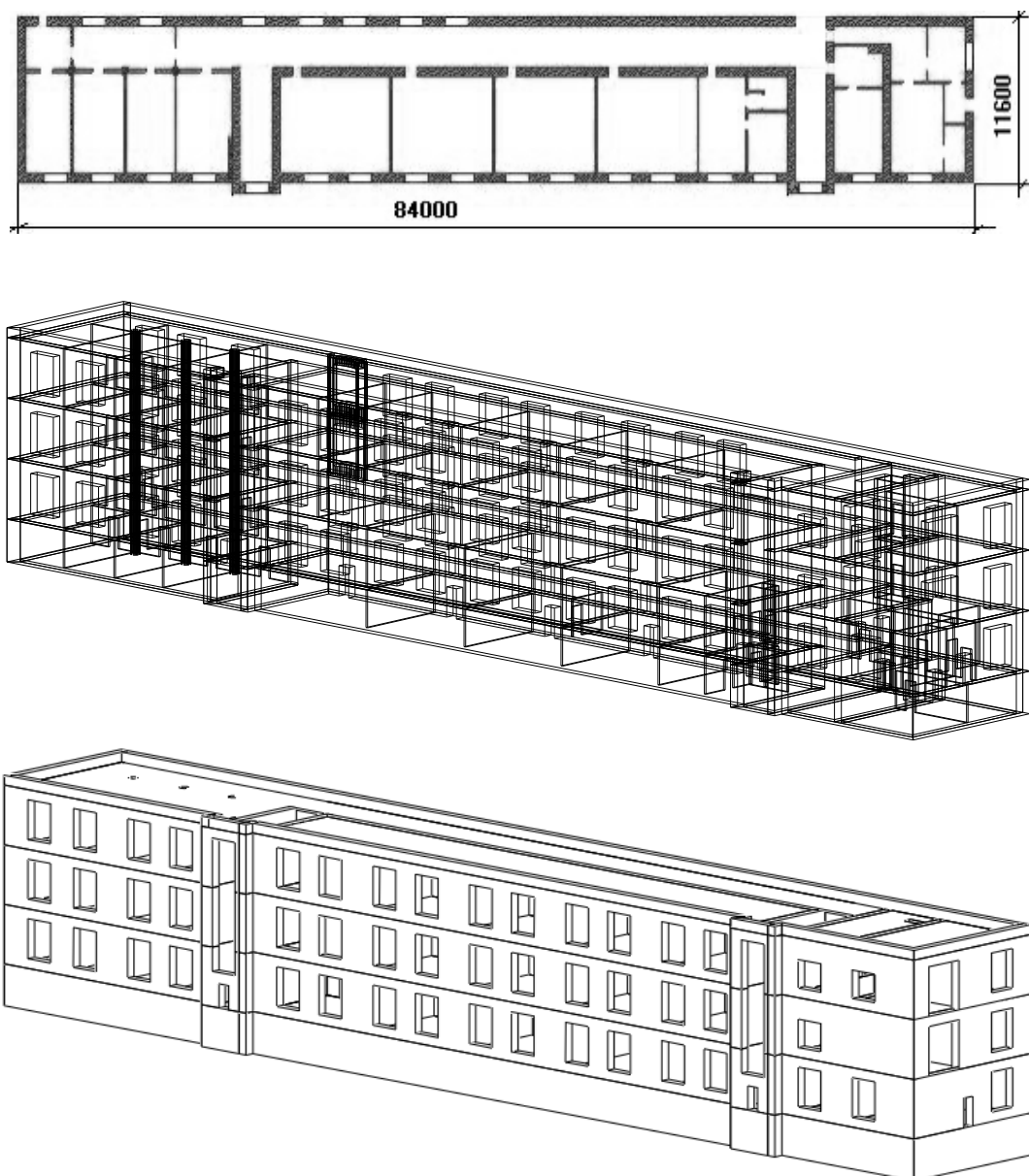


Рис. 3. План будівлі та фрагменти її статико-динамічної моделі (ґрунтова основа умовно не показана)

Особливість розрахунків системи «будівля (споруда) – ґрунтова основа» на дію повітряної вибухової хвилі полягає в тому, що ґрунт як елемент системи бере активну участь у роботі системи на динамічне навантаження. Щодо діючого навантаження, скористаємося спрощеним графіком залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі [10].

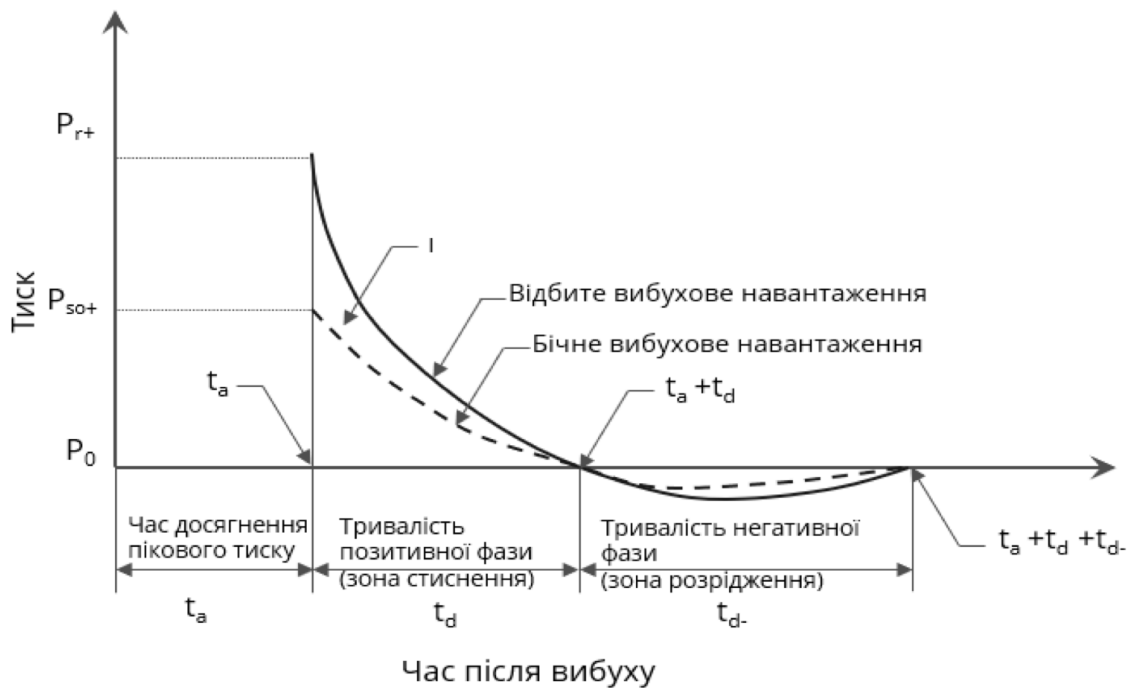


Рис. 4. Ідеалізований графік залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі [10]

При досягненні вибуховою хвилею поверхні будівлі виникає динамічна реакція, що викликає коливання її конструктивних елементів. Ці коливання досягають фундаментної частини будівлі та викликають реакцію ґрунтової основи. Ґрунт може виступати або як демпфер, тобто гасник коливань, або як резонатор, тобто їх підсилювач. Суттєве значення при цьому має склад ґрунтової основи, а також розмір її фрагменту, включений у розрахункову модель, а також граничні умови для цього фрагменту.

За результатами проведених досліджень було побудовано графіки залежностей коефіцієнтів до значень амплітуд ( $y$  %) від наведеної відстані  $r/r_0$  для різних типів ґрунтових умов, складу ґрунтових основ та частоти коливань. Як частотний діапазон досліджувалася смуга 2...25 Гц як найбільш поширена. Графіки представлені на рис. 5.

На цих графіках показані крайні положення кривих залежностей для різних видів ґрунтів у стані природної вологості та водонасиченому стані при частотах коливань джерела на поверхні ґрунту 2 та 25 Гц. Графіки, побудовані

для інших досліджених частот 5, 10 і 15 Гц, укладаються між цими крайніми кривими.

У проведених дослідженнях використовувався метод моделювання масиву ґрунту як основи будівель та споруд просторовими комплектами статико-динамічної (інерційної та пружно-дисипативної) моделі [1], що у динамічних задачах дозволяє найбільш точно врахувати структуру та фізико-механічні характеристики ґрунтів, односторонній характер зв'язків між видами, ґрунтових умов залежність зменшення амплітуд коливань від відстані до джерела динамічних впливів.

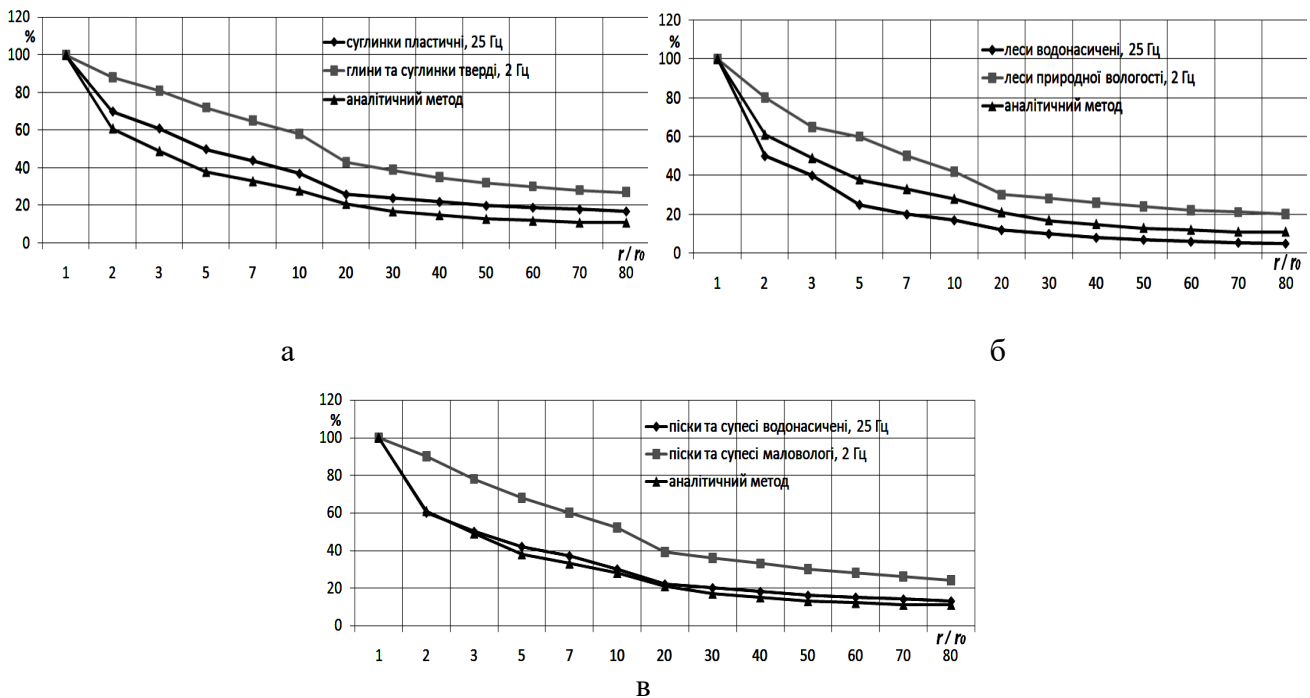


Рис. 5. Залежність коефіцієнтів до амплітуд переміщень контактних елементів будівлі ( $y$  %) від приведеної відстані при вертикальній дії: а) для глин та суглинків; б) для пісків та супісків; в) для лесових просідаючих ґрунтів

Обґрунтоване призначення в розрахунковій моделі розмірів фрагменту основи полягає у виконанні наступних умов [1]: товщина шару ґрунту під подошвою фундаменту повинна бути не менше глибини стиснутої товщі та не менше зони затухання коливань (наприклад, зі зниженням амплітуд вертикальних коливань у 10...30 разів); у кожний бік від граней будівлі або споруди – не менше 1,5 висоти будівлі та не менше зони затухання коливань. У другому випадку слід зважати на відстань від джерела коливань до обрізу фрагменту, де можливе відбиття коливань від зв'язків, накладених на межу фрагменту основи, і виникнення ефекту інтерференції коливальних хвиль у ґрунті. Проведено дослідження впливу відстані від джерела коливань до межі фрагмента на відхилення значень амплітуд коливань (рис. 6). Ефект інтерференції у прикладах з прийнятими параметрами затухає при відстані від

джерела до межі фрагменту не менше відстані від джерела до будівлі, і повністю зникає при 1,5 відстані від джерела до будівлі.

За результатами розрахунків статико-динамічної моделі на дію фронтальної повітряної вибухової хвилі, отримані характеристики коливань системи «будівля – ґрунтова основа» при відстані до джерела динамічного впливу 62 м та 125 м.

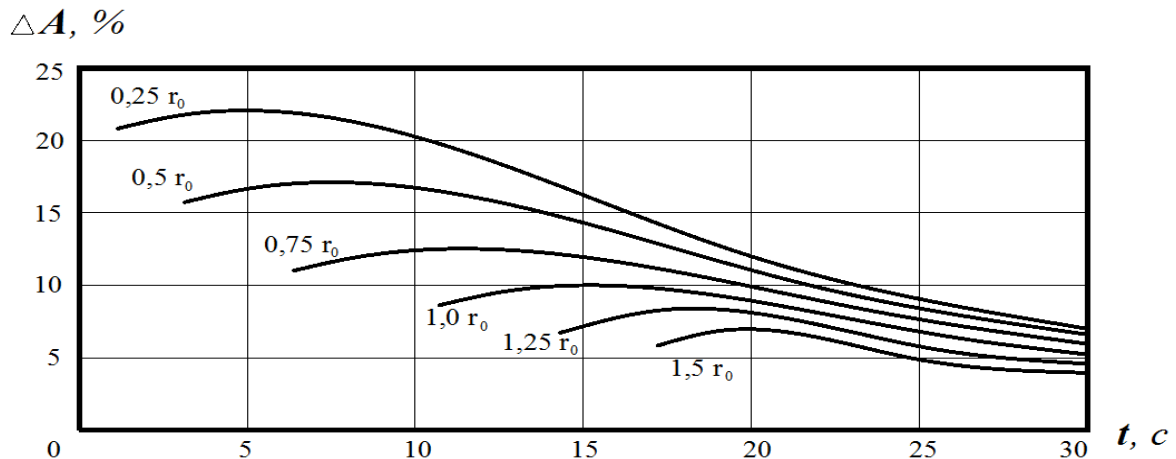


Рис. 6. Залежність відхилення значень амплітуд коливань від відношення відстані між джерелом та межею фрагмента до відстані між джерелом коливань та будівлею

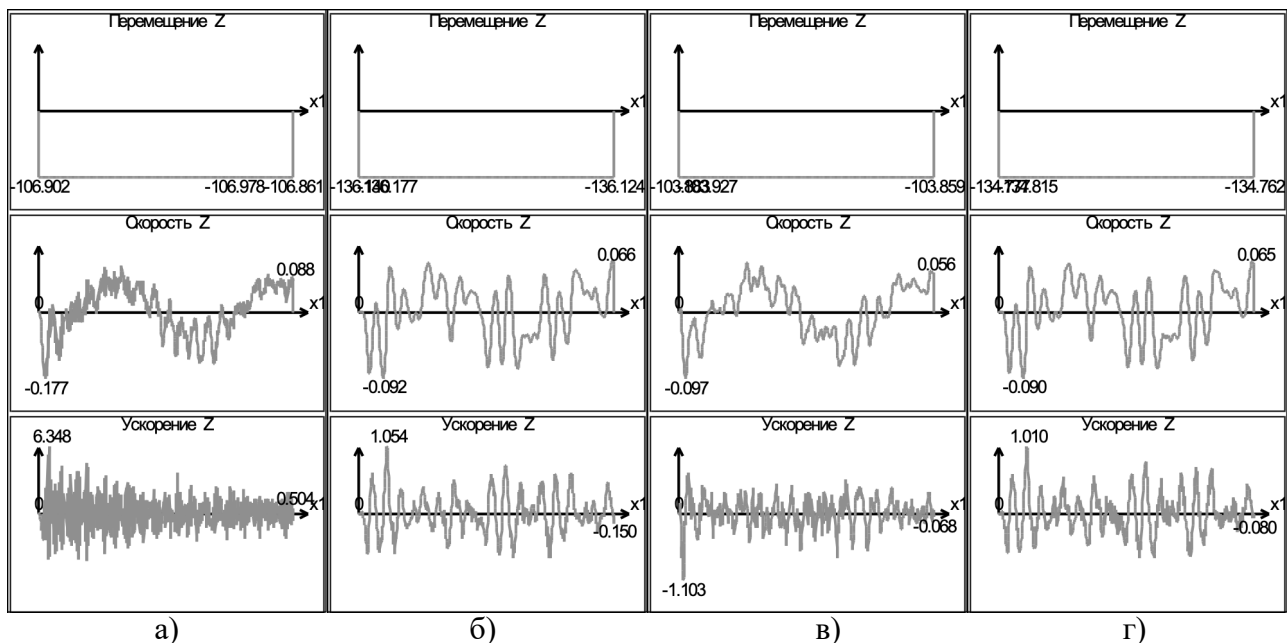


Рис. 7. Характеристики коливань поверхні ґрунту розрахункової моделі взаємодії будівлі з основою при повітряному вибуху: а) на відстані 62 м в середині будівлі; б) те саме, в зоні торця будівлі; в) на відстані 125 м в середині будівлі; г) те саме, в зоні торця будівлі

**Висновки та рекомендації подальшого дослідження.** Використання запропонованої методики дозволяє моделювати механізм впливу динамічних навантажень від повітряних вибухів та отримувати динамічні характеристики в

зоні контакту будівлі з ґрунтовою основою. При моделюванні будівель, які експлуатуються тривалий час у складних інженерно-геологічних умовах, необхідно враховувати їхній деформований стан уведенням попередніх деформацій. Результати розрахунків показали, що повітряні вибухи суттєво впливають на реакцію ґрунтової основи. Такий вплив вимагає аналізу з точки зору можливості погіршення напружено-деформованого стану конструкцій будівель, що в свою чергу впливає на їхній залишковий експлуатаційний ресурс. У випадках як наземних, так і повітряних вибухів, необхідно аналізувати реакцію ґрунтової основи і обов'язково враховувати це при визначенні напружено-деформованого стану будівель і споруд.

### Бібліографія

1. Банах В.А., Гребенюк І.В., Гребенюк О.В., Мешков К.В. Механізми передачі вибухових впливів на будівлі та споруди через ґрунтові основи в складних інженерно-геологічних умовах. *Просторовий розвиток*. Київ: КНУБА, 2025. Вип. 15. С. 236-245. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.15.236-245.
2. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-7:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи (EN 1991-1-7:2006/A1:2014, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 15 с.
3. Mykhailovskyi D.V., Skliarov I.O., Komar O.A. Analysis of calculation methods for explosion shock wave parameters in the design of protective structures. *Strength of materials and theory of structures: scientific and technical collection*. Kyiv: KNUBA, 2025. Issue 114. P. 173-182.
4. Іванченко Г.М., Гетун Г.В., Безклубенко І.С., Соломін А.В., Постернак О.М. Вплив вибухових навантажень на будівлі та споруди цивільного захисту населення. *Опір матеріалів і теорія споруд*. Київ: КНУБА, 2023. Вип. 111. С. 39-48.
5. Мартиновський К., Плоский В., Михальченко С., Скочко В. Аналіз впливу дії ударної хвилі на будівлі і споруди. *International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2024»*. Kyiv, 2024. P. 207-208. DOI: 10.59647/978-617-520-936-3/1.
6. Максименко В., Барабаш М., Костира Н., Бармін І. Моделювання динамічних навантажень вибухового типу в задачах дослідження міцності будівельних конструкцій з використанням ПК ЛІРА-САПР. *Наука та будівництво*. 2024. 38(4). DOI: 10.33644/2313-6679-4-2023-3.
7. 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.

DOI: 10.30838/J.PSACEA.2312.220222.7.827.

8. Шимановський О.В. Особливості вибухових навантажень та практичні прийоми захисту будівель від вибуху. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. Київ, 2019. № 4. С. 28–32.

9. Кочкаръов Д.В., Азізов Т.Н. Встановлення бальності ударних повітряних хвиль. *Науково-технічний симпозиум «Актуальні проблеми розрахунків будівельних конструкцій»*. Київ: SCAD Soft, 2024. С. 6-8.

10. Ромашкіна М., Пісаревський Б., Журавльов О. Розрахунок будівлі на вплив дії повітряної ударної хвилі прямим динамічним методом з використанням ПК ЛІРА-САПР. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2024. Вип. 14. DOI: 10.32347/2522-4182.14.2024.147-160.

11. Азізов Т.Н., Кочкаръов Д.В. До вибору методу розрахунку конструкцій на дії ударної хвилі. *Науково-технічний симпозиум «Актуальні проблеми розрахунків будівельних конструкцій»*. Київ: SCAD Soft, 2024. С. 12-15.

12. Марченко Д.В. Розрахунок будівель та споруд на вплив вибухової хвилі у ПК ЛІРА 10.14. Електронний ресурс:

[https://www.lira10.com/Content/Presentations/Marchenko\\_Blast\\_wave\\_impact\\_in\\_S\\_P\\_LIRA\\_1014\\_Rivne.pdf](https://www.lira10.com/Content/Presentations/Marchenko_Blast_wave_impact_in_S_P_LIRA_1014_Rivne.pdf).

13. Махінько А.В., Скляренко С.О. Чисельне моделювання навантажень від вибухових хвиль на будівлі та споруди і прогнозування ризику руйнувань їх конструктивних елементів. *Науково-технічний симпозиум «Актуальні проблеми розрахунків будівельних конструкцій»*. Київ: SCAD Soft, 2024. С. 31-33.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Andrii Banakh**,  
Senior Lecturer **Ihor Hrebenuik**, Senior Lecturer **Olena Hrebenuik**,  
**Kostiantyn MESHKOV**,  
Zaporizhzhia National University

## ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AIR BLAST WAVES FROM EXPLOSIONS ON BUILDINGS AND URBAN STRUCTURES

The features of the impact of air blast waves on urban development objects, as well as the cumulative effect of negative factors of explosive impacts are determined. It is accented that one of the urgent tasks for now and for the reconstruction in the post-war period is to inspect the technical state of buildings and structures that were under the influence of explosive loads, which significantly affect the bearing capacity of structures and the operational resource of such objects. The features of explosive loads are presented. The need to take into account soil foundations during the

modeling of dynamic impacts from explosions on buildings and structures is proven. The importance of clarifying the mechanism of impact from air blast waves on buildings and structures with previous deformations for complex engineering and geological conditions is shown. The features of the transmission of dynamic loads through soil foundations are considered. Data on real air explosions recorded by the earthquake registration software system for obtaining initial data on the parameters of seismic and explosive impacts are presented. A calculation model of the “building (structure) – soil ground” system under the action of an air blast wave has been constructed, where the soil as an element of such system takes an active part in its work. The dependences of the coefficients on the values of the amplitudes of oscillations on the given distance for different types of soil conditions, the composition of the soil grounds and the frequency of oscillations have been given. The influence of the distance from the source of oscillations to the fragment boundary on the deviation of the values of the amplitudes of oscillations has been studied. According to the results of the calculations, an analysis of possible mechanisms for the transmission of dynamic reactions of soil grounds during air blast effects on buildings and structures in complex engineering and geological conditions has been carried out. The principles and algorithm for determining the sizes of the soil ground fragment for modeling the interaction of the “building (structure) – soil ground” system have been shown. It has been confirmed that air explosions significantly affect the reaction of the soil ground and worsen the stress-strain state of building constructions, which affects their residual operational resource.

Keywords: explosive impacts; technical state; complex engineering and geological conditions; static-dynamic calculation model; dynamic reactions

## REFERENCES

1. Banakh V.A., Hrebeniuk I.V., Hrebeniuk O.V., Mieshkov K.V. Mekhanizmy peredachi vybukhovykh vplyviv na budivli ta sporudy cherez gruntovi osnovy v skladnykh inzhenerno-heolohichnykh umovakh. Prostorovyi rozvytok. Kyiv: KNUBA, 2025. Vyp. 15. S. 236-245. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.15.236-245. {in Ukrainian}.
2. DSTU-N B EN 1991-1-7:2010 Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1-7. Zahalni dii. Osoblyvi dynamichni vplyvy (EN 1991-1-7:2006/A1:2014, IDT). Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2018. 15 s. {in Ukrainian}.
3. Mykhailovskyi D.V., Skliarov I.O., Komar O.A. Analysis of calculation methods for explosion shock wave parameters in the design of protective structures. Strength of materials and theory of structures: scientific and technical collection. Kyiv: KNUBA, 2025. Issue 114. P. 173-182. {in English}.
4. Ivanchenko H.M., Hetun H.V., Bezklubenko I.S., Solomin A.V., Posternak

O.M. Vplyv vybukhovykh navantazhen na budivli ta sporudy tsyvilnoho zakhystu naselennia. Opir materialiv i teoriia sporud. K.: KNUBA, 2023. Vyp. 111. S. 39-48. {in Ukrainian}.

5. Martynovskyi K., Ploskyi V., Mykhalchenko S., Skochko V. Analiz vplyvu dii udarnoi khvyli na budivli i sporudy. International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2024». Kyiv, 2024. P. 207-208. DOI: 10.59647/978-617-520-936-3/1. {in Ukrainian}.

6. Maksymenko V., Barabash M., Kostyra N., Barmin I. Modeliuvannia dynamichnykh navantazhen vybukhovoho typu v zadachakh doslidzhennia mitsnosti budivelnykh konstruktsii z vykorystanniam PK LIRA-SAPR. Nauka ta budivnytstvo. 2024. 38(4). DOI: 10.33644/2313-6679-4-2023-3. {in Ukrainian}.

7. Barabash M.S., Kostyra N.O., Tomashevskiy A.V. Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu ta mitsnosti poskodzhenykh nesuchykh konstruktsii instrumentamy PK «LIRA-SAPR». Ukrainskiy zhurnal budivnytstva ta arkhitektury. 2022. № 1(007). S. 7-14. DOI: 10.30838/J.PSACEA.2312.220222.7.827. {in Ukrainian}.

8. Shymanovskyi O.V. Osoblyvosti vybukhovykh navantazhen ta praktychni pryiony zakhystu budivel vid vybukhu. Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy. 2019. № 4. S. 28–32. {in Ukrainian}.

9. Kochkarov D.V., Azizov T.N. Vstanovlennia balnosti udarnykh povitrianykh khvyl. Naukovo-tekhnichnyi sympozium «Aktualni problemy rozrakhunkiv budivelnykh konstruktsii». Kyiv: SCAD Soft, 2024. S. 6-8. {in Ukrainian}.

10. Romashkina M., Pisarevskiy B., Zhuravlov O. Rozrakhunok budivli na vplyv dii povitrianoi udarnoi khvyli priamym dynamichnym metodom z vykorystanniam PK LIRA-SAPR. Budivelni konstruktsii. Teoriia i praktyka. 2024. Vyp. 14. DOI: 10.32347/2522-4182.14.2024.147-160. {in Ukrainian}.

11. Azizov T.N., Kochkarov D.V. Do vyboru metodu rozrakhunku konstruktsii na dii udarnoi khvyli. Naukovo-tekhnichnyi sympozium «Aktualni problemy rozrakhunkiv budivelnykh konstruktsii». Kyiv: SCAD Soft, 2024. S. 12-15. {in Ukrainian}.

12. Marchenko D.V. Rozrakhunok budivel ta sporud na vplyv vybukhovoï khvyli u PK LIRA 10.14. Elektronnyi resurs: [https://www.lira10.com/Content/Presentations/Marchenko\\_Blast\\_wave\\_impact\\_in\\_SP\\_LIRA\\_1014\\_Rivne.pdf](https://www.lira10.com/Content/Presentations/Marchenko_Blast_wave_impact_in_SP_LIRA_1014_Rivne.pdf). {in Ukrainian}.

13. Makhinko A.V., Skliarenko S.O. Chyselne modeliuvannia navantazhen vid vybukhovykh khvyl na budivli ta sporudy i prohnozuvannia ryzyku ruinuvan yikh konstruktyvnykh elementiv. Aktualni problemy rozrakhunkiv budivelnykh konstruktsii. K.: SCAD Soft, 2024. S. 31-33. {in Ukrainian}.