

УДК 534.2:519.6:624.042

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ВИБУХОВИХ ТА ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ҐРУНТОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

І.І. Солодей,

д-р техн. наук, професор

Г.А. Затилюк,

д-р філософії з прикладної механіки, доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.67-74

У статті досліджено поширення вибухових та імпульсних навантажень у ґрунтових середовищах і їх вплив на напружено-деформований стан конструкцій. Показано обмеженість квазістатичних підходів. Проаналізовано характеристики вибухової хвилі, зокрема позитивну та негативну фази. Висвітлено роль хвильових процесів і нелінійної поведінки ґрунтів у підвищенні точності оцінки динамічної реакції конструкцій.

Ключові слова: вибухові навантаження, імпульсні навантаження, динаміка конструкцій, ґрунтові середовища, хвильові процеси, напружено-деформований стан, пластичні деформації.

Вступ. Інженерні розрахунки будівель та споруд під час проектування тісно пов'язані з оцінкою міцності і стійкості конструкцій та аналізом їхнього напружено-деформованого стану. При проектуванні будівель і споруд дедалі більше уваги приділяють оцінці їхньої міцності та стійкості за надзвичайних динамічних навантажень. Крім звичайних статичних і сейсмічних впливів, окремо розглядаються динамічні розрахунки від імпульсних ударів і вибухових впливів різного походження.

Однак виконувати такі розрахунки складно через те, що навіть сучасні математичні методи не повністю описують процеси поширення ударних хвиль у ґрунтах і в реакції конструкцій. Через це створювати адекватні розрахункові моделі практично неможливо.

Сучасні реалії вимагають захищати будівлі від екстремальних навантажень, зокрема від ударних хвиль вибухів. Надзвичайно важливо правильно оцінити зовнішні впливи, що діють на споруду: при проведенні розрахунків необхідно враховувати наявність джерела вібрації або імпульсу та швидкість його формування, фізико-механічні властивості ґрунту та його реакцію на зміну напрямку зсувів, а також конкретні особливості території, де стоїть будівля.

Особливістю вібраційних впливів є регулярна (періодична) зміна навантаження з часом. Тому при аналізі коливань конструкції під дією таких вібрацій головною увагою користуються усталеним режимом коливань, в який система переходить після закінчення перехідного (затухаючого) процесу.

Вібраційні впливи характеризуються певною періодичністю змін у часі. Тому при аналізі коливань під дією таких навантажень основну увагу приділяють усталеним режимам, до яких конструкція приходять після завершення перехідного процесу. Аварійний стан конструкцій при такому впливі може настати внаслідок накопичення напруження від втоми в режимі усталених коливань. Ефективні підходи розв'язання задач на періодичні коливання елементів конструкцій або їх деформування під дією рухомого навантаження наведено в [1, 2].

Імпульсні та вибухові навантаження характеризуються швидким наростанням інтенсивності від нульового рівня до пікового значення та подальшим різким спадом до нуля. За своєю суттю вони являють собою короткочасні інтенсивні імпульсні впливи, що спричиняють значне зростання напружень та виникнення пластичних деформацій у матеріалі конструкції.

При дослідженні систем, що збуджуються навантаженнями такого типу, головна увага має приділятися визначенню максимальної реакції конструкції. Максимальні реакції при імпульсному навантаженні досягаються за дуже короткий проміжок часу, до того як сили загасання зможуть поглинути велику частку енергії, що передається споруді.

Наразі в Україні при проектуванні конструкцій вплив вибухових навантажень у більшості випадків враховується шляхом їх представлення як квазістатичних навантажень. Амплітуди

таких навантажень визначаються відповідно до будівельних норм або за різними методиками, після чого вони застосовуються в розрахункових схемах як статичні навантаження.

Питання моделювання вибухових навантажень викликає значний інтерес серед міжнародної наукової спільноти. Дослідження в цій сфері проводять численні наукові групи, серед яких варто відзначити вітчизняних та закордонних вчених: М.С. Барабаш, А.Н. Бирбраер, О.І. Волощенко, І.П. Даценко, А.С. Городецький, В.І. Коцюруба, А.В. Перельмутер, J.R. Gilmore, H. Powell., M. Ramsden, L. Wang тощо.

Аналіз поширення вибухової хвилі аналізується в [3], однак досліджується розповсюдження та інтенсивність навантажень в залежності від різних вибухових речовин, не розглядаючи питання поширення в середовищах з різними характеристиками та враховуючи нелінійність, зокрема виникнення пластичних деформацій.

Огляд моделей та методів дослідження поширення вибухових навантажень в суцільних середовищах наводиться в [4].

Виклад основного матеріалу. Закон зміни тиску з часом $p_s(t)$ при вибуховому навантаженні в повітрі зображено на Рис. 1 і описується функцією Фрідлендера [5].

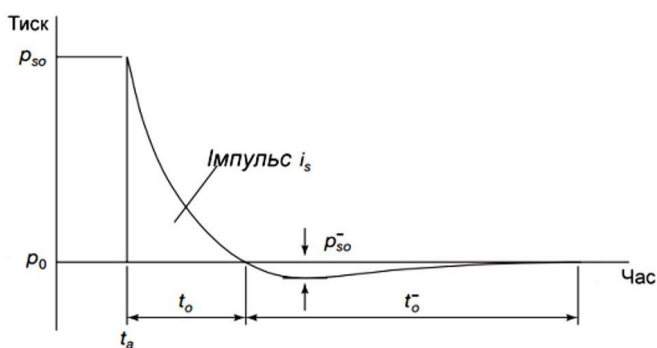


Рис. 1. Типовий графік залежності тиску вибухової хвилі від часу у повітрі. p_{so} – максимальне значення тиску після вибуху; t_a – час досягнення пікового тиску; t_0 – позитивна фаза (зона стиснення); t_{0-} – негативна фаза (зона розрідження)

Питомий позитивний імпульс i_s є площею під кривою тиск-час інтегрованою за тривалістю позитивної фази:

$$i_s = \int_0^{t_0} p_s(t) dt. \quad (1)$$

В інженерній практиці для спрощення розрахунків часто ігнорують негативну фазу вибухової хвилі. Водночас врахування цієї фази в аналітичних або чисельних розрахунках дозволяє отримати більш точні та достовірні результати, що підвищує надійність і безпеку проєктованих конструкцій [6].

Питомий негативний імпульс i_r можна записати аналогічно до (1):

$$i_r = \int_{t_0}^{t_0-} p_s(t) dt. \quad (2)$$

Функція вибухової хвилі може бути описана експоненціальними функціями, такими як рівняння Фрідлендера для позитивної фази вибуху:

$$p_s(t) = p_{so} \left(1 - (t/t_0)\right) e^{-bt/t_0}, \quad (3)$$

де: $p_s(t)$ – надлишковий тиск у момент часу t ; p_{so} – максимальний надлишковий тиск; t – час, що минув з моменту приходу ударної хвилі; t_0 – тривалість позитивної фази вибуху; b – коефіцієнт затухання хвилі, що визначає швидкість зниження тиску.

Максимальний надлишковий тиск для вибуху в повітрі може бути знайдений за формулами:

$$p_{so} = \frac{6,7}{Z^3} + 1, \quad p_s > 1 \text{ МПа}, \quad (4)$$

$$p_{so} = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019, \quad 10 \text{ кПа} < p_s < 1 \text{ МПа}, \quad (5)$$

Z – це приведена відстань, що визначається зі співвідношення:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}, \quad (6)$$

де R – відстань від центра сферичного заряду в метрах; W – маса заряду, виражена в кілограмах тротилового еквіваленту (ТНТ).

Для практичних розрахунків часто використовують ідеалізований графік зміни тиску вибуху у часі, в якому зміну надлишкового тиску з часом апроксимують лінійною функцією, тривалістю t_d (Рис. 2). Позитивну фазу тут спрощено до трикутної площі i_s з миттєвим зростанням (катет p_{so}) та лінійним спаданням за час t_d .

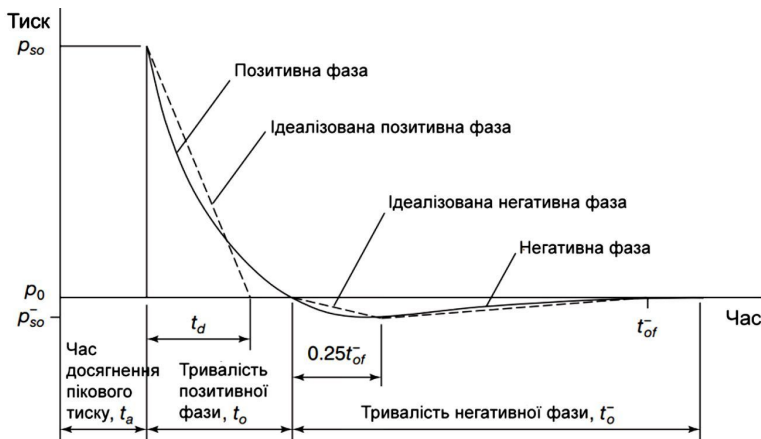


Рис. 2. Ідеалізований графік залежності тиску вибухової хвилі від часу у повітрі

В такому разі позитивний імпульс i_s дорівнює:

$$i_s = \frac{p_{so} t_d}{2}. \quad (7)$$

Виходячи з умови забезпечення збереження імпульсу протягом позитивної фази, тривалість t_d визначається:

$$t_d = \frac{2i_s}{p_{so}}. \quad (8)$$

При врахуванні негативної фази вибухової хвилі, піковий негативний надлишковий тиск (тиск нижче атмосферного) у негативній фазі вибуху знаходиться за формулою:

$$p_{so}^- = -\frac{0,35}{Z}, \quad Z > 1,6 \text{ м/кг}^{1/3}, \quad (9)$$

$$i_i^- \approx i_s \left[1 - \frac{1}{2Z} \right]. \quad (10)$$

Надійність і довговічність споруд значною мірою залежать від коректного врахування взаємодії конструкції з ґрунтовою основою. Поширення хвильових процесів у товщі ґрунту створюють вплив та додаткове навантаження на конструкції.

Поглинання енергії вибухових навантажень і поширення хвиль у ґрунтовому середовищі залежить від місця вибуху:

- при вибуху в повітрі – ефект незначний;
- при вибуху на поверхні – можливі пошкодження внаслідок хвильових процесів в ґрунті;
- при заглибленому вибуху – майже вся енергія передається ґрунту без втрат у атмосферу.

Максимальний надлишковий тиск p_{so} виражається залежністю:

$$p_{so} = \rho C u, \quad (10)$$

де ρ – щільність ґрунту; C – швидкість хвилі в середовищі; u – швидкість частинок ґрунту, яка визначається за формулою:

$$u = 48,8 f_c \left(\frac{2,52R}{W^{1/3}} \right)^{-n}, \quad (11)$$

де f_c – безрозмірний коефіцієнт, який від відображає ефективність передачі енергії вибуху ґрунтовому середовищу, залежно від ступеня взаємодії між зарядом і ґрунтом [7, 8]. Фактично залежить від приведеної глибини вибуху: співвідношення фактичної глибини вибуху H (м) до

маси заряду W , вираженої в кілограмах тротилового еквіваленту (ТНТ); n – безрозмірний коефіцієнт затухання, який залежить від виду ґрунту. чим більш порушена структура (тріщини, порожноти), тим більше затухання і, відповідно, більше значення коефіцієнта [7]. Водонасичення призводить до сповільнення затухання.

Швидкість хвилі в середовищі C залежить від швидкості поширення сейсмічних хвиль c та швидкості частинок ґрунту u . Причому біля епіцентру вибуху C набуває високих значень і з віддаленням зменшується до сейсмічної швидкості c .

Для глин в стані повного водонасичення:

$$C = c. \quad (12)$$

Для водонасичених глин:

$$C = 0,6c + \left(\frac{n+1}{n-2}\right)u. \quad (13)$$

Для пісків та великоуламкових ґрунтів:

$$C = c + \left(\frac{n+1}{n-2}\right)u. \quad (14)$$

Позитивний імпульс i_s визначається співвідношенням:

$$i_s = \rho C x, \quad (15)$$

де x – максимальне переміщення ґрунтових частинок (м), визначається за формулою:

$$x = 60W^{1/3} \frac{f_c}{c} \left(\frac{2,52R}{W^{1/3}}\right)^{1-n}, \quad (16)$$

Часова форма імпульсу зазвичай апроксимується трикутною діаграмою, як і для повітряної хвилі (3) і з врахування (10) та (15):

$$t_d = (2x)/u. \quad (17)$$

Від осередку вибуху розповсюджуються хвилі:

- поздовжні або Р-хвилі, які утворюються рухом часток вперед і назад вздовж напрямку поширення хвилі;
- поперечні або S-хвилі, які утворюються коливаннями часток у напрямку, перпендикулярному руху хвилі;
- поверхневі хвилі Релея, у яких рух часток складається з вертикальних і горизонтальних складових, а сама частка рухається по еліптичній траєкторії.

Слід враховувати, що хвилі Р рухаються швидше, ніж хвилі S, однак хвилі S характеризуються більш високими ампліудами.

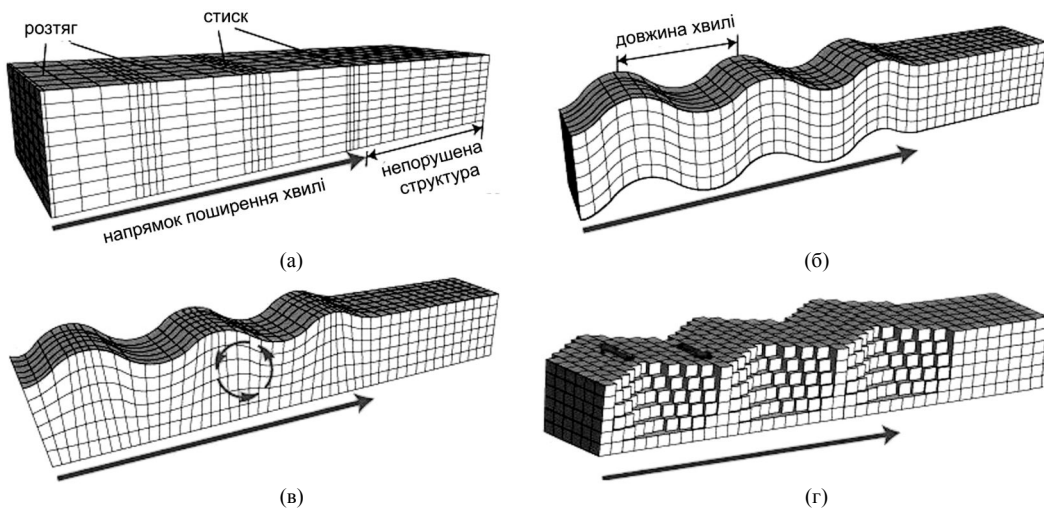


Рис. 3. Основні типи хвиль: (а) поздовжні або Р-хвилі; (б) поперечні або S-хвилі; (в) поверхневі хвилі Релея; (г) хвилі Лява

Враховуючи, що вибухові навантаження являють собою інтенсивні короточасні імпульсні впливи і супроводжуються великими зростаннями напружень та виникненням пластичних деформацій, а хвилі що виникають при вибухах здійснюють різні види навантажень на середовище. Крім того, при проходженні хвилі виникають зони стиску, з ущільненням основи та розтягу [8].

Відомо, що ґрунти – матеріали з вираженою нелінійною еластопластичною поведінкою, характер якої змінюється в залежності від виду навантаження. На рисунках 4, 5 зображено графіки залежності деформацій від напружень в ґрунтах при компресійних випробуваннях (моделюється ізотропне навантаження). Крім того, на практиці розрахунок реальних об'єктів зі складною історією навантажень-розвантажень слід виконувати з уточненим модулем деформації.

При малих напруженнях і деформаціях ґрунт реагує майже пружно. Однак при вибухових навантаженнях напруження можуть досягати десятків МПа та значних деформацій. У цьому діапазоні починають проявлятися пластичні деформації, процеси ущільнення та розуцільнення.

Висновки. Результати досліджень підтверджують, що вплив вибухових хвиль на конструкції ґрунтується на комплексних хвильових процесах та істотній нелінійності ґрунту, що не можуть бути адекватно описані квазістатичними методами. Максимальні ефекти розповсюдження хвиль досягаються при заглиблених вибухах ($f_c \approx 1$), коли практично вся енергія передається ґрунту.

Врахування нелінійної еластопластичної поведінки ґрунту забезпечує отримання більш точних значень пікового тиску та імпульсу порівняно з лінійними розрахунками. Включення негативної фази хвилі дозволяє отримати більш достовірні результати реакції ґрунту та конструкцій на динамічний вплив.

При описі імпульсного деформування особливо важливим стає урахування сил інерції та ефектів розповсюдження пружних і непружних хвиль. Слід також відрізнити середні значення напружень і деформацій від локальних, що виникають в результаті проходження по матеріалу однієї або більше високоінтенсивних хвиль напружень. Математично, модель таких процесів реалізується у вигляді лінійних або нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, для розв'язання яких рекомендовано прямі методи безпосереднього інтегрування по часовій координаті, яким присвячено багаточисельні дослідження питань збіжності та стійкості [9, 10, 11], залишаючи модальні методи для проблем, що пов'язані з використанням нижньої частини частотного спектра.

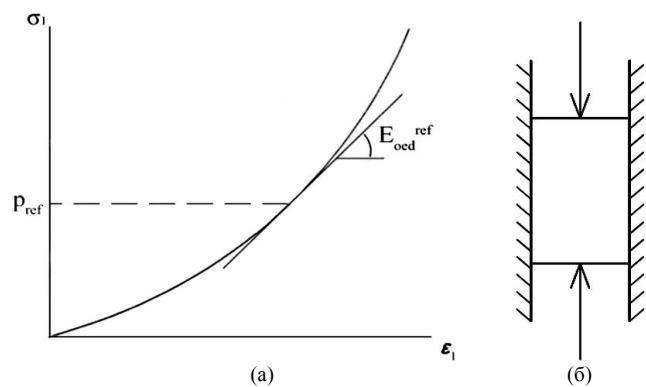


Рис. 4. Деформування ґрунтів при випробуваннях методом тривісного стиску: (а) – графік залежності деформацій від напружень при випробуваннях методом компресійного стиску; (б) – схема випробувань ґрунтів в приборі компресійного стиску (одометрі)

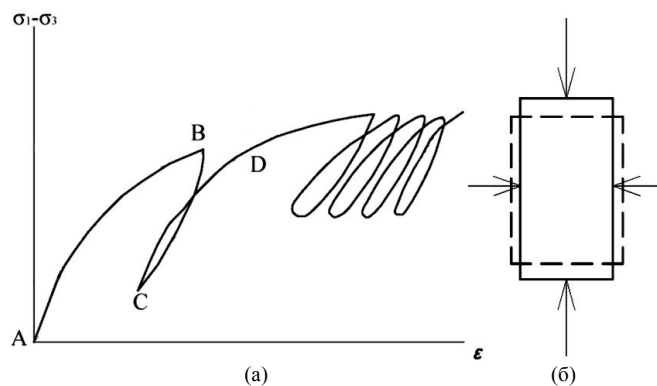


Рис. 5. Деформування ґрунтів при компресійних випробуваннях: (а) – графік залежності деформацій від напружень при випробуваннях методом тривісного стиску (A-B – гілка первинного навантаження, B-C – гілка розвантаження, C-D – гілка повторного навантаження); (б) – схема випробувань ґрунтів в приборі тривісного стиску (стабілометрі)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карнаухов В.Г., Ревенко Ю.В. Стационарні коливання та дисипативний розігрів в'язкопружних тонкостінних елементів при дії на них рухомого навантаження // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2002. Вип. 9, т. 8. С. 97–103.
2. Пановко Я.Г., Губанова І.І. Устойчивость и колебания упругих систем. М. : Наука, 1987. 352 с.
3. Figuli L. et al. Numerical analysis of the blast wave propagation due to various explosive charges // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020, No. 1. P. 8871412.
4. Солодей І. І., Затилук Г. А., Петренко Е.Ю., Шовківська В. В. Огляд математичних моделей поширення вибухових навантажень в суцільних середовищах // Опір матеріалів і теорія споруд. 2025. Вип. 114. С. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.76-82>
5. Kong R., Kim S., Ishii M. Review of jet impingement in high-energy piping systems // Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 357. Art. 110411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110411>
6. Rigby S. E., Tyas A., Bennett T., Clarke S. D., Fay S. D. The negative phase of the blast load // International Journal of Protective Structures. 2014. Vol. 5, No. 1. P. 1–20.
7. Xia C., Chen L., Xu R., Cao M., Chen D., Fang Q. Experimental and numerical studies on ground shock generated by large equivalent surface explosions // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 16. Art. 7987.
8. Wang I.-T. Nonlinear dynamic response and deformation analysis of soil under the explosion shock loading // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22, No. 7. P. 1648–1660. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21306>
9. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1982. 447 с.
10. Bathe K.Y., Wilson E.L. Stability and accuracy of direct integration methods // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1973. Vol. 1. P. 283–291.
11. Nickell R.E. On the stability of approximation operators in problem of structural dynamics // International Journal of Solids and Structures. 1971. Vol. 7. P. 301–319.

REFERENCES

1. Karnaukhov V.H., Revenko Yu.V. Stationary vibrations and dissipative heating of viscoelastic thin-walled elements under moving load // Bulletin of the National Technical University "KhPI". 2002. Issue. 9, v. 8. P. 97–103.
2. Panovko Ya.H., Hubanova I.I. Ustoichyvost i kolebaniya uprugykh system (Stability and vibrations of elastic systems.). М. : Nauka, 1987. 352 p.
3. Figuli L. et al. Numerical analysis of the blast wave propagation due to various explosive charges // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020, No. 1. P. 8871412.
4. Solodei I. I., Zatyliuk Gh. A., Petrenko E.Yu., Shovkivska V. V. Ohliad matematychnykh modelei poshyrennia vybukhovyykh navantazhen v sustilnykh seredovyshchakh (Review of explosive load propagation mathematical models in continuous environments) // Strength of Materials and Theory of Structures. 2025. Issue 114. P. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.76-82>
5. Kong R., Kim S., Ishii M. Review of jet impingement in high-energy piping systems // Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 357. Art. 110411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110411>
6. Rigby S. E., Tyas A., Bennett T., Clarke S. D., Fay S. D. The negative phase of the blast load // International Journal of Protective Structures. 2014. Vol. 5, No. 1. P. 1–20.
7. Xia C., Chen L., Xu R., Cao M., Chen D., Fang Q. Experimental and numerical studies on ground shock generated by large equivalent surface explosions // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 16. Art. 7987.
8. Wang I.-T. Nonlinear dynamic response and deformation analysis of soil under the explosion shock loading // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 22, No. 7. P. 1648–1660. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21306>
9. Bate K., Wilson E. Chyслenne metody analiza i metod konechnykh elementov (Numerical methods of analysis and finite element method). М. : Stroiyzdat, 1982. 447 p.
10. Bate K.Y., Wilson E.L. Stability and accuracy of direct integration methods // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1973. Vol. 1. P. 283–291.
11. Nickell R.E. On the stability of approximation operators in problem of structural dynamics // International Journal of Solids and Structures. 1971. Vol. 7. P. 301–319.

Стаття надійшла 07.04.2026

Солодей І.І., Затилюк Г.А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ВИБУХОВИХ ТА ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ГРУНТОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У статті розглянуто особливості поширення вибухових та імпульсних навантажень у ґрунтових середовищах і їх вплив на напружено-деформований стан будівельних конструкцій. Показано, що сучасні підходи до проєктування часто базуються на квазістатичному представленні вибухових навантажень, що не повною мірою відображає їх динамічну природу та може призводити до зниження точності розрахунків. Проаналізовано часові характеристики вибухової хвилі, зокрема позитивну та негативну фази, а також наведено аналітичні залежності для визначення надлишкового тиску та імпульсів навантаження. Розглянуто застосування рівняння Фрідлендера та спрощених трикутних апроксимацій для інженерних розрахунків.

Особливу увагу приділено поширенню хвильових процесів у ґрунтових масивах, включаючи поздовжні, поперечні та поверхневі хвилі, а також впливу фізико-механічних властивостей ґрунту на затухання та трансформацію хвиль. Встановлено, що характер передачі енергії вибуху значною мірою залежить від умов взаємодії джерела вибуху з ґрунтовим середовищем, глибини закладання заряду та структурної неоднорідності ґрунту. Показано, що при заглиблених вибухах значна частина енергії передається у ґрунт, формуючи інтенсивні хвильові процеси, які можуть суттєво впливати на конструкції.

Проаналізовано нелінійну еластопластичну поведінку ґрунтів при динамічних навантаженнях, що супроводжується розвитком пластичних деформацій, ущільненням і розущільненням матеріалу. Підкреслено необхідність урахування цих ефектів при моделюванні динамічної відповіді системи «основа–споруда». Врахування негативної фази вибухової хвилі та нелінійних властивостей ґрунту дозволяє підвищити достовірність розрахункових моделей і забезпечити більш надійну оцінку роботи конструкцій в умовах екстремальних впливів.

Ключові слова: вибухові навантаження, імпульсні навантаження, динаміка конструкцій, ґрунтові середовища, хвильові процеси, напружено-деформований стан, пластичні деформації.

Solodei I.I., Zatyliuk Gh.A.

STUDY OF THE PROPAGATION OF EXPLOSIVE AND IMPULSIVE LOADS IN SOIL ENVIRONMENTS

The paper considers the features of propagation of explosive and impulsive loads in soil media and their influence on the stress-strain state of building structures. It is shown that modern design approaches are often based on the quasi-static representation of explosive loads, which does not fully reflect their dynamic nature and may lead to reduced accuracy of calculations. The time characteristics of a blast wave, including the positive and negative phases, are analyzed, and analytical relationships for determining overpressure and load impulses are presented. The application of the Friedlander equation and simplified triangular approximations for engineering calculations is discussed.

Special attention is paid to the propagation of wave processes in soil masses, including longitudinal, transverse, and surface waves, as well as to the influence of the physical and mechanical properties of soils on wave attenuation and transformation. It is established that the nature of energy transfer from an explosion largely depends on the interaction conditions between the explosive source and the soil medium, the depth of charge placement, and the structural heterogeneity of the soil. It is shown that in the case of buried explosions, a significant part of the energy is transferred into the soil, generating intense wave processes that may substantially affect structures.

The nonlinear elastoplastic behavior of soils under dynamic loading is analyzed, which is accompanied by the development of plastic deformations, compaction, and decompaction processes. The necessity of considering these effects in modeling the dynamic response of the “soil–structure” system is emphasized. Taking into account the negative phase of the blast wave and the nonlinear properties of soils makes it possible to improve the reliability of computational models and to ensure a more accurate assessment of structural performance under extreme loading conditions.

Keywords: explosive loads, impulsive loads, structural dynamics, soil media, wave propagation, stress-strain state, plastic deformations.

УДК 534.2:519.6:624.042

Солодей І.І., Затилюк Г.А. **Дослідження процесів поширення вибухових та імпульсних навантажень у ґрунтових середовищах** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2026. – Вип. 116. – С. 67-74.

У статті досліджено поширення вибухових та імпульсних навантажень у ґрунтових середовищах і їх вплив на напружено-деформований стан конструкцій. Показано обмеженість квазістатичних підходів. Проаналізовано характеристики вибухової хвилі, зокрема позитивну та негативну фази. Висвітлено роль хвильових процесів і нелінійної поведінки ґрунтів у підвищенні точності оцінки динамічної реакції конструкцій.

Іл. 5. Бібліогр. 11 назв.

UDC 534.2:519.6:624.042

Solodei I.I., Zatyliuk Gh.A. **Study of the Propagation of Explosive and Impulsive Loads in Soil Environments** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv:KNUCA, 2026. – Issue 116. – P. 67-74.

The paper investigates the propagation of explosive and impulsive loads in soil media and their influence on the stress-strain state of structures. The limitations of quasi-static approaches are demonstrated. The characteristics of blast waves, including the positive and negative phases, are analyzed. The role of wave processes and the nonlinear behavior of soils in improving the accuracy of evaluating the dynamic response of structures is highlighted.

Fig. 5. Ref. 11

Автор: доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки СОЛОДЕЙ Іван Іванович
Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55
E-mail: solodei.ii@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7638-3085>

Автор: доктор філософії з прикладної механіки, доцент, доцент кафедри будівельної механіки ЗАТИЛЮК Герман Анатолійович
Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
E-mail: zatyliuk.ha@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0392-2214>