

В.В. Бойко, д.т.н., проф.**Ю.І. Войтенко, д.т.н.***Інститут гідромеханіки НАН України***А.Л. Ган, к.т.н., доц.***НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***Т.В. Хлевнюк, к.т.н., с.н.с.****Є.А. Загоруйко, к.т.н., доц.***Інститут гідромеханіки НАН України***О.В. Ган, к.т.н.***НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Оцінка сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням їх власної гармоніки у вибуховому спектрі цивільного і воєнного характерів

У статті наведено теоретичні й експериментальні дослідження закономірностей повторюваності збуджених техногенними вибухами сейсмічних хвиль для оцінки сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури. Теоретично розглянуто характер розповсюдження хвильових збурень на межі пружного півпростору при його локальному збудженні. Як основа цих досліджень застосовано інтегральні перетворення Лапласа і Фур'є, чисельне рішення яких дозволяє отримати значення періодів повторюваності збурень пружних хвиль на межі півпростору. На основі теоретичних досліджень встановлено закономірність періодів повторюваності збурень пружних хвиль, які за певних умов можуть створити резонансні явища в об'єктах, що охороняються, зокрема на гармоніці, близькій до частоти власних коливань конструкції. Підтвердження цих результатів на практиці одержано при ураженні ракетними ударами критичної інфраструктури (телевежа м. Києва) та в умовах проведення вибухових робіт на кар'єрах, як приклад на Коціївському гранітному кар'єрі ТОВ «СПАН» при оцінці сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури, зокрема опори ліній ЛЕП 330 кВ, які розташовані в зоні впливу пружних хвиль. Вони базуються на формуванні закономірностей збудження та поширенні пружних хвиль і визначенні їх параметрів на відстані від джерела збудження (масових вибухів на кар'єрі) з використанням апаратурного комплексу стандартних сейсмодатчиків СМ-3, 16-канального аналого-цифрового перетворювача (АЦП Е14-440) фірми L-Card і персонального комп'ютера (ПК). Оцінка впливу інтенсивності сейсмовибухових хвиль проводилася на частоті амплітуди максимальної швидкості коливань як у основі опори, що є нормою сейсмічної безпеки відповідно до ДСТУ 4704:2008, так і у самій конструкції опори (що є не обов'язковим відповідно до ДСТУ 4704:2008). Але наявність у вибуховому спектрі гармоніки, близької до власних коливань конструкції, спричиняє утворення у ній резонансних явищ, що приводить до збільшення швидкості коливань у самій конструкції, ніж в основі опори. Тому за критерій сейсмобезпеки приймається максимальна швидкість на частоті, близькій до власних коливань, або у основі опори, або на її конструкції. Такий параметр хвилі буде найкраще корелювати з пошкодженням або завданням ушкодження цій споруді та був запропонований як норма її сейсмостійкості. Отримані таким чином результати досліджень спонукали авторів до пропозиції доповнення чинного ДСТУ.

Ключові слова: пружні хвилі; перетворення Лапласа і Фур'є; критична інфраструктура; вибух цивільного та воєнного характерів; максимальна швидкість коливань; частота коливань; резонансні явища; норми сейсмічної безпеки.

Актуальність теми. Під час проведення вибухів цивільного та воєнного характерів у повітрі, на земній поверхні або під землею від епіцентру джерела розповсюджуються пружні хвилі. Хвильові збурення різної потужності залежно від характеру вибуху поширюються на забудовану територію критичної інфраструктури, де розташовані будівлі та різного роду споруди. Ці збурення взаємодіють з об'єктами і приводять їх в рух, що в деяких випадках може бути для них критичним. Тому врахування характеру розповсюдження хвильових збурень, як в основі споруди, так і в її конструкціях, дасть можливість забезпечити необхідну сейсмостійкість об'єктів критичної інфраструктури від вибухового навантаження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Сьогодні найбільш поширена методика оцінки ступеня безпеки сейсмічного впливу за критерієм масової швидкості коливань в основі споруди, з урахуванням лише сейсмічних властивостей порід та міцнісних, конструктивних і динамічних характеристик охоронного об'єкта [1–7].

У випадку сейсмічних збурень можуть мати місце повторювані збурення, які характеризуються періодичністю. У цьому випадку можливе утворення резонансних явищ, які також можуть бути критичними для будівель та споруд [3, 6–7].

Загальноприйнятим для розв'язання початково-крайових задач є метод скінчених різниць. У цьому контексті вводиться стиснуте відображення $x = 1 - e^{-kx}$, яке перетворює напівнескінченний інтервал зміни $x \in [0, \infty)$ у скінченний інтервал змінної $x \in [0, 1]$, де k – коефіцієнт стиснення. Додатково вводиться допоміжна змінна $W_x(x, t) = U_t(x, t)$, $W(0, t) = 0$. Отримана в результаті система рівнянь складніша за початкову (через появу змінних коефіцієнтів), але вона визначена на скінченному інтервалі, що є зручним для чисельних методів. Також розглядається задача розповсюдження імпульсу від циліндричної порожнини в пружному середовищі за допомогою стискаючого відображення $\xi = b - \exp[-kr(t - a)]$, яке перетворює напівнескінченний інтервал $[a, \infty)$ в скінченний $[b - 1, b]$ для змінної b . Тоді маємо $\xi = b$ при $t \rightarrow \infty$, але $\xi \neq b - 1$ при $t = a$.

Можна розглянути пружно-в'язкий півпростір, де тензор напружень виражений у вигляді $\hat{P}\sigma_{ij} = 2G\hat{Q}\varepsilon_{ij} + \lambda\hat{P}\theta\delta_{ij}$, $i, j, n = 1, 2, 3$, де $\theta = u_{n,n}$, \hat{P} і \hat{Q} – лінійні диференційні оператори, $\hat{P} = \sum_{k=0}^m a_k \frac{\partial}{\partial t^k}$, $\hat{Q} = \sum_{k=0}^n b_k \frac{\partial}{\partial t^k}$, а значення a_k і b_k – це скалярні величини, що характеризують пружно-в'язкі властивості матеріалу; у цьому випадку сумування виконується за індексами, які повторюються. У випадку тіла Кельвіна отримані рішення для півпростору, який піддається дії імпульсу. Можна також розглянути задачу розповсюдження нестійких хвиль від кругової порожнини, до стінок якої прикладено імпульс тиску типу функції Хевісайда та побудувати прифронтові асимптотичні рішення. Це безпосередньо пов'язано з випадком вибуху заряду вибухової речовини (ВР), заглибленого у свердловинних порожнинах.

Метою статті є вивчення та урахування власної гармоніки конструкції у вибуховому спектрі для удосконалення критерію сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури та доповнення існуючого ДСТУ.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо задачу розповсюдження хвиль у пружному півпросторі при збудженні поверхні імпульсом, який локально розподіляється в просторових координатах і змінюється з часом як функція Хевісайда.

Для виявлення повторюваних збуджень у сейсмічній хвилі та встановлення їх періодичності, яка за певних умов може призвести до резонансних явищ в охоронних об'єктах.

Постановка задачі. До поверхні, в початковий момент часу $t = 0$, прикладається локально розподілений вплив, який змінюється з часом як функція Хевісайда. Розглянемо початково-крайову задачу для рівняння еластодинаміки

$$c_e^2 \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) - c_s^2 \nabla \times \nabla \times \vec{u} = \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}, \quad -\infty < x < \infty, z \geq 0, t > 0, \quad (1)$$

$$\sigma_{zz}(x, z, t)|_{z=0} = -p_0 p_1(t) p_2(x), \quad \sigma_{xz}(x, z, t)|_{y=0} = 0, \quad (2)$$

$$\vec{u}(x, z, t)|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

де: \vec{u} – вектор переміщення; σ_{xy} та σ_{zz} – компоненти тензора напружень; c_e і c_s – швидкості розповсюдження дилатаційної та еквіволюмінальної хвиль у пружному середовищі, $c_e = \sqrt{\frac{\lambda + G}{\rho}}$, $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$; λ і G – пружні сталі Ламе; ρ – густина середовища; ν – коефіцієнт Пуассона.

Безрозмірні величини введені за формулами (зірочки опущено)

$$(x^*, z^*, \vec{u}^*) = \frac{1}{h} (x, z, \vec{u}), \quad t^* = \frac{c_e}{h} t, \quad (4)$$

$$c_s^* = \frac{c_s}{c_e} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}}, \quad c_e^* = 1, \quad p_0^* = \frac{p_0}{c_e^2 \rho}.$$

Рівняння (1) з урахуванням (4) призводить до двох хвильових рівнянь для скалярного та векторного потенціалів

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c_e^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad \nabla^2 \vec{a} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \vec{a}}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \varphi + \vec{\nabla} \times \vec{a}, \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{a} = 0, \quad \vec{a} = \vec{e}_z a.$$

Далі вводяться інтегральні перетворення Лапласа і Фур'є:

$$f^L(x, z, p) = \int_0^{\infty} f(x, z, t) e^{-pt} dt, \quad (6)$$

$$f^{FL}(k, z, p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, z, p) e^{-ikx} dx,$$

Розв'язок для скалярного і векторного потенціалів в області образів Фур'є – Лапласа, враховуючи (5) і (6), мають такий вигляд

$$\varphi^{FL} = -p_0 p_1(p) p_2(k) \frac{p^2 + 2c_s^2 k^2}{\Delta(k^2)} e^{-z\eta_e}, \quad (7)$$

$$a^{FL} = -p_0 p_1(p_2)(k) \frac{2ik\eta_e c_s^2}{\Delta(k^2)} e^{-z\eta_s},$$

де
$$\Delta(k^2) = (p^2 + 2k^2 c_s^2)^2 - 4k^2 c_s^4 \eta_e \eta_s, \quad \eta_e = \sqrt{k^2 + \frac{p^2}{c_e^2}}, \quad \eta_s = \sqrt{k^2 + \frac{p^2}{c_s^2}}.$$

Далі, на основі (4) та (7), визначаємо зсуви u_x та u_z на вільній поверхні $z = 0$. У просторі зображень Лапласа вони виражені таким чином

$$u_x^L(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} p_0 p_1(p) \int_0^{\infty} \frac{p_2(k) k (p^2 + 2c_s^2 k^2 - 2\eta_e \eta_s c_s^2)}{\Delta(k^2)} \sin kx dk, \quad (8)$$

$$u_z^L(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} p_0 p_1(p) \int_0^{\infty} \frac{p_2(k) p^2 \eta_e}{\Delta(k^2)} \cos kx dk.$$

При введенні нової змінної $u = k/p$, з рішень (8), ми отримуємо такі вирази для переміщень

$$u_x^L(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} p_0 p_1(p) \int_0^{\infty} p_2(pu) F_1 \sin pux du, \quad (9)$$

$$u_z^L(x, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} p_0 p_1(p) \int_0^{\infty} p_2(pu) F_2 \cos pux du,$$

де

$$\Delta(c_s, u) = (1 + 2c_s^2 u^2)^2 - \frac{4u^2 c_s^3}{c_e} \sqrt{1 + c_e^2 u^2} \sqrt{1 + c_e^2 u^2 c_s^2},$$

$$F_1 = \frac{1 + 2c_s^2 u^2 - 2\frac{c_s}{c_e} \sqrt{1 + c_e^2 u^2} \sqrt{1 + c_s^2 u^2}}{\Delta(c_s, u)}, \quad F_2 = \frac{\sqrt{1 + c_e^2 u^2}}{c_e \Delta(c_s, u)}.$$

Невласні інтеграли, які входять до формул (9), мають вигляд:

$$J \cong \sum_{k=0}^m J_k, \quad J_k = \int_{2\pi k}^{2\pi(k+1)} f(u) du, \quad (J_m \leq \varepsilon). \quad (10)$$

Величини J_k в (10) обчислюються чисельно за допомогою формули парабол (Сімпсона), а значення верхнього індексу сумування m встановлюється з умови заданої похибки ε .

Для побудови оригіналів використовується метод чисельного перетворення Лапласа за допомогою зміщених поліномів Лежандра:

$$f(t) = \sum_{k=0}^m (2k+1) a_k P_k^*(r^{-t}), \quad (11)$$

де $P_k^*(r^{-t})$ – зміщений поліном Лежандра.

$$P_k^*(e^{-t}) = \sum_{i=0}^k \alpha_i^{(k)} e^{-it}, \quad a_k = \sum_{i=0}^k \alpha_i^{(k)} F(i+1), \quad (12)$$

$$\alpha_i^{(k)} = -(-1)^{k+i} \binom{k}{i} \frac{(k+i)!}{k!i!}.$$

Таким чином, кожен шуканий оригінал визначається за допомогою співвідношення (11), якщо замість $F(i+1)$ в (12) підставити відповідні рішення – зображення.

Як приклад, розглянемо випадок, коли навантаження розподілене за законом $p_2(x) = \frac{1}{1+x^2}$ і змінюється в часі як функція Хевісайда $p_1(t) = H(t)$ Перетворення Фур'є та Лапласа для $p_2(x)$ і $p_1(t)$ мають вигляд: $p_2(k) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-|k|}$, $p_1(p) = \frac{1}{p}$. Розрахунки були проведені для точок на поверхні при $y = 0$ і $x = 0, 1, 2, 4, 6, 10, 50, 60$ при значенні коефіцієнта Пуассона $\nu = 0,25$.

На графіку (рис. 1) наведено результати обчислень горизонтального переміщення u_x і вертикального переміщення u_z як функцій часу в точках $x = 0$ і $x = 4$. Переміщення нормовані множителем $\frac{2p_0}{\pi c_e \rho}$.

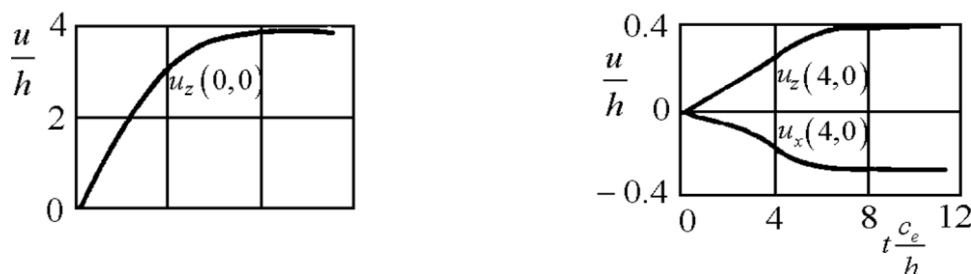


Рис. 1. Графічні залежності горизонтального u_x і вертикального переміщення u_z від функцій часу (відхилення вільної поверхні)

Під час проведення теоретичних досліджень було встановлено періодичність повторювань збуджень у сейсмічній хвилі, яка за певних умов може створювати резонансні явища на існуючі будівлі та споруди критичної інфраструктури.

Отримані результати теоретичних досліджень були підтвержені при дослідженні впливу масових вибухів № 1 і № 2, характеристики яких наведено в таблиці 1 в умовах Кошівського гранітного кар'єру на опорі ЛЕП 330 кВ, що була розташована відповідно на відстанях 380 м і 440 м від блоків, які підірвалися.

Таблиця 1

Характеристики буровибухових робіт (БВР)

№ з/п	Характеристики БВР	Масовий вибух № 1	Масовий вибух № 2
1	Тип вибухових матеріалів	грамоніт ГР 50/50	грамоніт ГР 50/50
2	Маса вибухових зарядів, кг:		
	- загальна	1320	1120
	- в одній свердловині	43	30
3	Вага на одне сповільнення в максимальній групі,	150	150
4	Інтервал сповільнення	для 6-ти груп – 40 мс та 5-ти – 80 мс	для 11-ти груп – 40 мс
5	Максимальні питомі витрати ВР, кг/м3	0,9	0,98
6	Система ініціювання	НЕСІ	НЕСІ
7	Параметри сітки свердловинних зарядів ВР:		
	- загальна кількість вертикальних свердловин, шт	36	37
	- діаметр свердловини, мм	115	115
8	Схема вибухової мережі	врубова	врубова
9	Умови висаджування	проходка траншеї	проходка траншеї
10	Загальний час ініціювання зарядів	280 мс	400 мс

При загальній масі ВР 1320 кг масового вибуху № 1 середня маса заряду ВР, яка вибухає за 1 мс становила 4,9 кг, а при масовому вибуху № 2 – 2,8 кг.

Для проведення досліджень застосовувався апаратурний комплекс, який складається зі стандартних однокомпонентних електромагнітних сейсмодатчиків СМ-3, електричні сигнали від якого подаються на 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП Е14-440) фірми L-Card і далі на персональний комп'ютер (ПК).

Сейсмоприймачі СМ-3 (рис. 2) встановлювалися на ґрунтовій основі опори ЛЕП і на її конструкції на висоті 1,5 м і положення сейсмоприймачів не змінювалося між вибухами 1 і 2.

На рисунку 3 представлено осцилограми відповідно вибухів № 1 (а) і № 2 (б) за вертикальною складовою, а в таблиці 2 наведено максимальні значення швидкості коливань u_z та відповідні їм частоти.

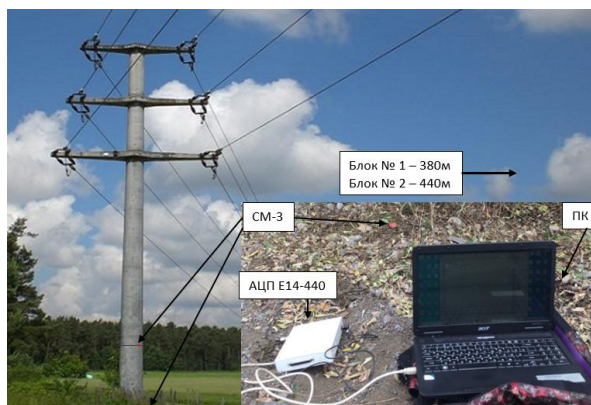


Рис. 2. Схема розташування апаратурного комплексу при дослідженні впливу масових вибухів № 1 і № 2 в умовах Коціївського гранітного кар'єру на опорі ЛЕП 330 кВ

Таблиця 2

Максимальні значення швидкості зміщення часток ґрунту (см/с) на конструкції опори і її ґрунтовій основі

Місце установки сейсмоприймача	Вибух № 1		Вибух № 2	
	u_z , см/с	Частота, Гц	u_z , см/с	Частота, Гц
Конструкція опори ЛЕП 330 кВ	0,64	26,5	0,45	22,5
Ґрунт основи опори ЛЕП 330 кВ	0,85	50,2	0,37	35,5

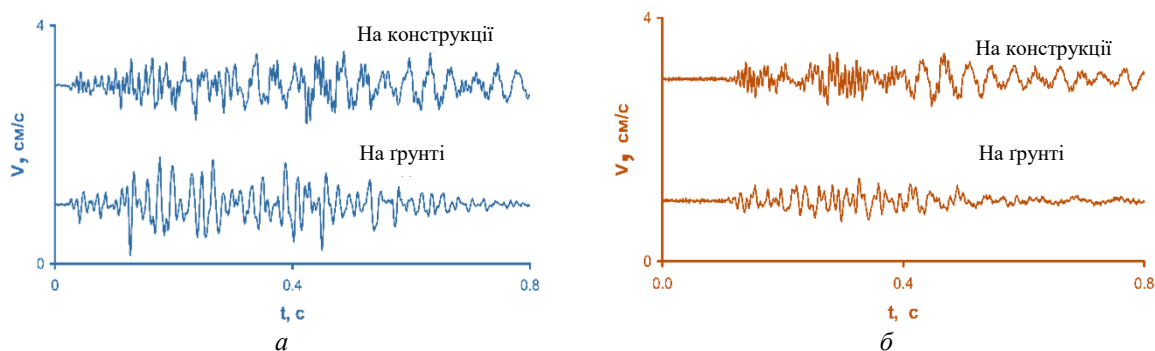


Рис. 3. Осцилограми масових вибухів № 1 і № 2 за вертикальною складовою

Аналізуючи осцилограми з рисунка 3, амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) з рисунків 4–5 і максимальні значення швидкості зміщення часток ґрунту, можна помітити, що під час вибуху заряду № 1 швидкість коливання ґрунтової основи опори становила 0,85 см/с при частоті 50,2 Гц, що більша, ніж швидкість коливання самої конструкції опори – 0,64 см/с при частоті 26,5 Гц, а при вибуху заряду № 2 – навпаки, швидкість коливань у самій конструкції становила 0,45 см/с при частоті 22,5 Гц, що більша, ніж в основі опори – 0,37 см/с при частоті 35,5 Гц, яка в 1,2 раза більше, ніж норма, за якою мала би бути прийнята відповідно до ДСТУ 4704:2008 (оскільки допустимі норми визначаються за даними пікових амплітуд коливань і частоти, що одержані на ґрунтовій основі споруди). Збільшення швидкості в конструкції є свідченням наявності у вибуховому спектрі частот, наближених до власної гармоніки конструкції опори.

Тому у цьому випадку доцільно за критерій сейсмобезпеки при вибуху № 1 прийняти максимальну швидкість коливання ґрунтової основи опори, а при вибуху № 2 – максимальну швидкість коливань у самій конструкції опори та по ДСТУ визначено допустимі маси зарядів та сейсмобезпечних відстаней.

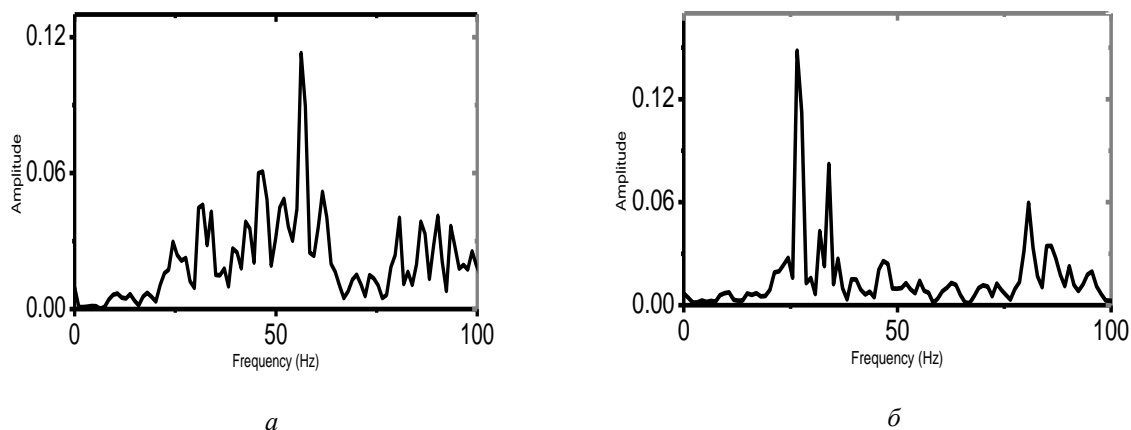


Рис. 4. Спектри сейсмічних коливань, записаних сейсмоприймачами, що встановлені на ґрунті (а) і на конструкції опори (б) під час вибуху № 1

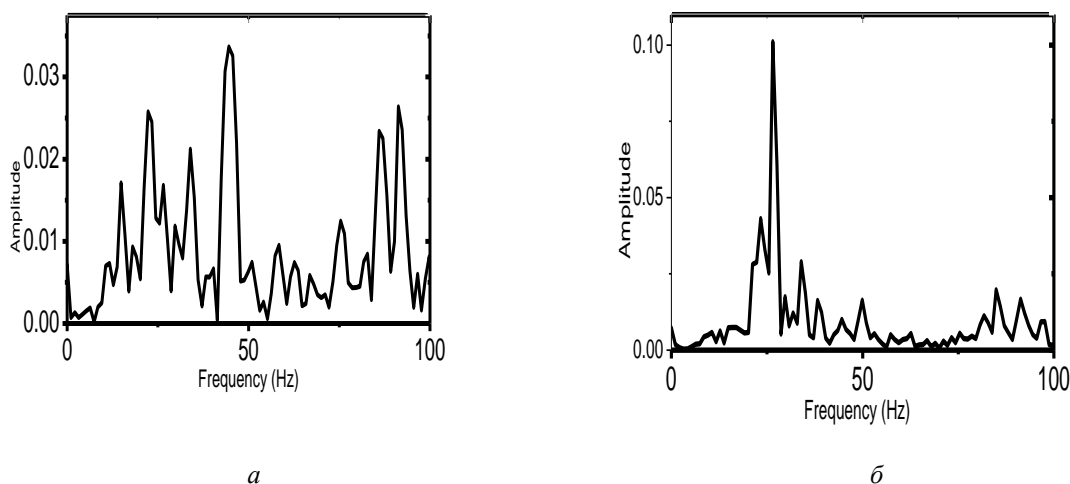


Рис. 5. Спектри сейсмічних коливань, записаних сейсмоприймачами, що встановлені на ґрунті (а) і на конструкції опори (б) під час вибуху № 2

Отже, під час проведення експериментів оцінка рівня сейсмобезпеки проводилася за критерієм, суть якого полягає в тому, що на межі розподілу ґрунт-фундамент опори ліній ЛЕП 330 кВ за максимальною швидкістю на частоті, близькій до власних коливань, у ґрунтовому масиві або конструкції опори приймається такий параметр хвилі, який найкраще корелює з пошкодженням або завданням ушкодження цій споруді та може бути прийнятий як норма її сейсмостійкості, тобто для сейсмобезпеки приймається максимальна швидкість коливань.

По сейсмо- і спектрограмам для складання алгоритму задачі з поширення хвильових збурень від межі пружного півпростору при його локальному збудженні в різні моменти часу визначалися початкові параметри в місці їх виникнення, властивості середовища між джерелом збудження та охоронним об'єктом, які впливають на характер затухання коливань, закономірності затухання на відстані з урахуванням геометричної розбіжності та власних коливань споруди. Результати дослідження закономірностей повторюваності збуджених масовими вибухами сейсмічних коливань дозволили виявити регулярні збурення у цих хвилях та їх можливий вплив на явища, близькі до резонансних на межі розподілу ґрунт-фундамент опори ліній ЛЕП 330 кВ, що вимагає перегляду та доповнення норм сейсмічної безпеки ДСТУ 4704:2008 для забезпечення безпеки будівель та споруд в умовах сейсмічної активності.

У результаті проведених спостережень отримано підтвердження того, що при дослідженні дії СВХ на охоронний об'єкт необхідно проводити спектральний аналіз коливального процесу як на ґрунтовій основі так і на самій конструкції споруди, а також аргументовано показано, що модуль повного вектора швидкості зміщення часток ґрунту за значеннями складових коливань (X, Y, Z) визначається тільки в той самий час, що і коливальний процес.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналіз отриманих результатів теоретичних та експериментальних досліджень дозволив виявити повторювані збурення у сейсмічних хвилях та встановити їхню періодичність, а також вплив на охоронні будівлі та споруди при можливому створенні явищ, близьких до резонансних.

За критерій сейсмобезпеки доцільно прийняти максимальну швидкість на частоті, близькій до власних коливань, або у основі опори, або на її конструкції. Такий параметр хвилі буде найкраще корелювати з пошкодженням або завданням ушкодження споруди та був запропонованим як норма її сейсмостійкості. Отримані таким чином результати досліджень спонукали авторів до пропозиції доповнення діючого ДСТУ.

Отримані в процесі досліджень результати оцінки сейсмостійкості об'єктів критичної інфраструктури від цивільних вибухів можна використати під час оцінки збитків, нанесених масовими ударами рф по Україні для подання позовів щодо їхнього відшкодування.

Список використаної літератури:

1. Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки : ДСТУ 4704:2008. – Чинний від 2009-01-01. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 11 с.
2. Вибухи промислові. Методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд : ДСТУ 7116:2009. – Чинний від 2010-01-04. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2010. – 6 с.
3. Правила безпеки під час поводження з вибуховими матеріалами промислового призначення : НПАОП О.00-1.66-13. – Київ : ДП «Редакція журналу “Охорона праці”», 2013. – 359 с.
4. *Бойко В.В.* Спеціальні вибухові технології в геoinженерії : монографія / *В.В. Бойко, А.Л. Ган, О.В. Ган.* – Київ : КІП ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 316 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097>.
5. *Бойко В.В.* Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху : монографія / *В.В. Бойко, В.Г. Кравець, В.В. Коробіичук.* – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 408 с.
6. *Бойко В.В.* Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України : монографія / *В.В. Бойко.* – Київ : ТОВ «Видавництво Сталь», 2012. – 235 с.
7. Efficiency of using explosive foam compositions for compacting structurally unstable soil / *V.Boiko and other* // Central european journal of energetic materials. – 2023. – Vol. 20, № 4. – P. 442–454. DOI: 10.22211/cejem/176913.
8. Технічні правила ведення вибухових робіт на денній поверхні (32392) : НПАОП 0.00-1.67-13. – Чинний від 2023-06-02. – Київ : ДП, 2013. – 120 с.

References:

1. *DSTU 4704:2008. Provedennia promyslovykh vybukhiv. Normy seismichnoi bezpeky* (2009), Chynnyi vid 2009-01-01, Vyd. Ofits, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, Kyiv, 11 p.
2. *DSTU 7116:2009. Vybukhy promyslovi. Metody vyznachennia faktychnoi seismostiikosti budivel i sporud* (2010), Chynnyi vid 2010-01-04, Vyd. Ofits, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, Kyiv, 6 p.
3. *NPAOP O.00-1.66-13. Pravyla bezpeky pid chas povodzhennia z vybukhovymy materialamy promyslovoho pryznachennia* (2013), DP «Redaktsiia zhurnala “Okhorona pratsi”», Kyiv, 359 p.
4. Boiko, V.V., Han, A.L., Han, O.V. (2022), *Spetsialni vybukhovi tekhnolohii v heoinzhenerii*, monohrafiia, KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 316 p., [Online], available at: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49097>
5. Boiko, V.V., Kravets, V.H. and Korobiichuk, V.V. (2015), *Fizychni protsesy prykladnoi heodynamiky vybukhu*, monohrafiia, ZhDTU, Zhytomyr, 408 p.
6. Boiko, V.V. (2012), *Problemy seismichnoi bezpeky vybukhovoї spravy u karierakh Ukrainy*, monohrafiia, TOV «Vydavnytstvo Stal», Kyiv, 235 p.
7. Boiko, V. et al. (2023), «Efficiency of using explosive foam compositions for compacting structurally unstable soil», *Central european journal of energetic materials*, Vol. 20, No. 4, pp. 442–454, doi: 10.22211/cejem/176913.
8. *NPAOP 0.00-1.67-13. Tekhnichni pravyla vedennia vybukhovyykh robit na dennii poverkhni (32392)* (2013), Chynnyi vid 2023-06-02, DP, Kyiv, 120 p.

Бойко Віктор Вікторович – доктор технічних наук, професор Інституту гідромеханіки НАН України.
<https://orcid.org/0000-0003-3443-1688>.

Наукові інтереси:

- гірнича справа;
- промислова сейсмобезпека вибухів;
- гуманітарне та бойове розмінювання;
- сейсмобезпека та захист критичної інфраструктури.

Войтенко Юрій Іванович – доктор технічних наук Інституту гідромеханіки НАН України.
<https://orcid.org/0000-0003-3077-2207>.

Наукові інтереси:

- гірнича справа;
- фізика і механіка хвильових процесів при підриванні зарядів вибухових речовин.

Ган Анатолій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-0832-1338>.

Наукові інтереси:

- вибухові роботи;
- гірнича справа;
- геоінженерія;
- гуманітарне та бойове розмінування;
- сейсмобезпека та захист критичної інфраструктури.

Хлевнюк Тамара Вікторівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0001-8024-1864>.

Наукові інтереси:

– підвищення надійності оцінки сейсмобезпеки будівель та споруд при проведенні короткосповільнених масових вибухів на кар'єрах.

Загоруйко Євген Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-2710-3934>.

Наукові інтереси:

- геоінженерія;
- підвищення стійкості схилів у слабких масивах.

Ган Олена Валеріївна – старший викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-0739-9600>.

Наукові інтереси:

- захист навколишнього середовища;
- геоінженерія;
- вибухова справа;
- гуманітарне розмінування;
- захист критичної інфраструктури.

Boiko V.V., Voitenko Yu.I., Han A.L., Khlevniuk T.V., Zahoruiko Ye.A., Han O.V.
Assessment of earthquake resistance of critical infrastructure objects, taking into account their own harmonics in the explosive spectrum of civil and military characters

The article presents theoretical and experimental studies of the patterns of repeatability of seismic waves excited by man-made explosions to assess the earthquake resistance of critical infrastructure objects. The nature of propagation of wave perturbations at the boundary of an elastic half-space during its local excitation is theoretically considered. These studies are based on the integral Laplace and Fourier transformations, the numerical solution of which makes it possible to obtain the values of the repetition periods of elastic wave perturbations at the half-space boundary. On the basis of theoretical studies, the regularity of periods of repetition of perturbations of elastic waves is established, which under certain conditions can create resonant phenomena in protected objects, in particular at a harmonic close to the frequency of natural vibrations of the structure. Confirmation of these results in practice was obtained when critical infrastructure was hit by missile strikes (Kyiv TV tower) and in the conditions of blasting operations at quarries, as an example at the Koshchiivske granite quarry of LLC "SIPAN" when assessing the earthquake resistance of critical infrastructure objects, in particular the supports of 330 kW power lines, which are located in the zone of influence of elastic waves. They are based on the formation of patterns of excitation and propagation of elastic waves and determination of their parameters at a distance from the source of excitation (mass explosions at the quarry) using a hardware complex of standard seismic sensors SM-3, a 16-channel analog-to-digital converter (ADC E14-440) of L-Card and a personal computer (PC). Assessment of the influence of the intensity of seismic explosion waves was carried out at the frequency of the amplitude of the maximum speed of vibrations both at the base of the support, which is the norm of seismic safety in accordance with DSTU 4704:2008 and in the structure of the support itself (which is not mandatory in accordance with DSTU 4704:2008). But the presence of harmonics in the explosive spectrum that is close to the natural vibrations of the structure leads to the formation of resonant phenomena in it, which leads to an increase in the speed of vibrations in the structure itself than in the base of the support. Therefore, the maximum speed at a frequency close to its own vibrations or at the base of the support or on its structure is taken as a criterion of seismic safety. Such a wave parameter will best correlate with damage or harm to this structure and was proposed as the norm of its earthquake resistance. The research results obtained in this way prompted the authors to propose a supplement to the current DSTU.

Keywords: elastic waves; Laplace and Fourier transforms; critical infrastructure; civil and military explosion; maximum oscillation rate; oscillation frequency; resonant phenomena; seismic safety standards.

Стаття надійшла до редакції 16.05.2024.