

## МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПОВЕРХНЕВОЇ СЕЙСМОВИБУХОВОЇ ХВИЛІ З ОСНОВОЮ СПОРУДИ, ЩО ОХОРОНЯЄТЬСЯ

*Н. С. Ремез, докт. техн. наук, Ю. С. Яценко, асп. (НТУУ «КПІ»)*

*Наведено результати чисельного моделювання взаємодії сейсмовибухової хвилі з прямокутним фундаментом об'єкта, що охороняється, з урахуванням частотних характеристик коливань та параметрів фундаменту.*

*Ключові слова: сейсмовибухова хвиля, період коливань, землетрус, чисельне моделювання.*

*Приведены результаты численного моделирования взаимодействия сейсмозрывной волны с прямоугольным фундаментом охраняемого объекта с учетом частотных характеристик колебаний и параметров фундамента.*

*Ключевые слова: сейсмозрывная волна, период колебаний, землетрясение, численное моделирование.*

*The results of numerical simulation of seismic wave interaction with rectangular foundation of protected object have been given with taking into account oscillation frequency and foundation parameters.*

*Key words: seismic blast wave, period of oscillation, earthquake, numerical simulation.*

**Аналіз стану проблеми.** Використання енергії вибуху зарядів хімічних вибухових речовин, розширення обсягів вибухових робіт та масштабів вибухів, зокрема ведення їх поблизу різних споруд, будівель, комунікацій зумовлюють необхідність чіткого розрахунку та ефективних методів управління впливами сейсмічних хвиль.

Проблема взаємодії сейсмовибухових хвиль з елементами конструкцій у ґрунтах (природними і інженерними об'єктами) є зараз досить актуальною, оскільки такі об'єкти під впливом техногенних навантажень знаходяться в зоні ризику. При цьому виникає проблема прогнозованої оцінки стійких властивостей таких конструкцій, що неможливо без точного знання впливу і характеру дії зовнішніх сил. Тому виникає необхідність детального вивчення характеру взаємодії сейсмовибухових навантажень на об'єкт, що охороняється, з його фундаментом.

Більшість робіт по дослідженню стійкості споруд присвячено вивченню впливу сейсмічних хвиль від землетрусів [1–5]. Досліджень впливу сейсмовибухових хвиль на природні та інженерні об'єкти значно менше [6–7].

**Мета роботи** – дослідити вплив частотних характеристик сейсмовибухових хвиль і параметрів споруди на інтенсивність її коливань.

**Матеріал та результати досліджень.** У роботі здійснено чисельне моделювання сейсмічної дії вибуху на фундамент споруди, що охороняється. При цьому використовується підхід, розроблений в праці [8].

Розглядається задача про рух жорсткого однорідного тіла прямокутної форми, що знаходиться в безмежному пружному середовищі, під дією падаючої сейсмічної хвилі. Початок декартової системи координат суміщається з центром мас тіла, осі розташовані вздовж сторін прямокутника. Вважається, що фронт падаючої хвилі досягає меж тіла в момент часу  $t = 0$ .

При  $t < 0$  тіло знаходиться в стані спокою, а повний вектор переміщення в середовищі  $\mathbf{u}$  з компонентами  $u$  і  $v$  співпадає з вектором зміщення  $\mathbf{u}_+$  в падаючій хвилі

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_+(c(t)t - x \sin e + y \cos e) \quad (\mathbf{u}_+(t) = 0, \quad t \leq 0), \quad (1)$$

де  $e$  – кут між віссю  $x$  і фронтом падаючої хвилі;  $c(t)$  – швидкість поширення падаючої хвилі.

Рух жорсткого прямокутного тіла описується зміщенням центру мас  $\mathbf{u}^*$  з компонентами  $u^*$   $v^*$  і малим кутом повороту  $\alpha^*$ :

$$m\mathbf{u}^{*\prime\prime}(t) = \mathbf{R}(t), \quad \mathbf{I}\alpha^{*\prime\prime}(t) = \mathbf{M}(t) \quad (2)$$

з нульовими початковими умовами

$$\mathbf{u}^*(0) = \mathbf{u}^{*\prime}(0) = 0, \quad \alpha^*(0) = \alpha^{*\prime}(0) = 0, \quad (3)$$

де  $m$  – маса тіла одиничної товщини;  $\mathbf{I}$  – момент інерції тіла відносно центру мас;  $\mathbf{R}$  і  $\mathbf{M}$  – відповідно рівнодіюча і момент (відносно центру мас) напружень, що діють на тіло з боку пружного середовища і виражаються через нормальне напруження  $\sigma_n$  на поверхні тіла таким чином:

$$R(t) = \oint_{\Gamma} \sigma_n(t) d\Gamma, \quad M(t) = \oint_{\Gamma} [\sigma_n(t)r] d\Gamma. \quad (4)$$

Рух середовища описується динамічним рівнянням Ляме

$$(\lambda + 2\mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} - \mu \operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (5)$$

де коефіцієнти Ляме  $\lambda$  і  $\mu$ , а також щільність  $\rho$  пов'язані зі швидкостями поздовжніх  $a$  та поперечних  $b$  хвиль в середовищі формулами:  $a^2 = (\lambda + \mu)/\rho$ ,  $b^2 = \mu/\rho$ .

Початкові умови для розв'язання (5) задаються у вигляді (1), а граничні умови в такому вигляді:

$$\tau_{xy}|_{\Gamma} = 0, \quad u'_n|_{\Gamma} = u'_* + [r \times \alpha'_* k]. \quad (6)$$

Задача обмежується розглядом лише поступального руху тіла.

В результаті використаної в [8] методики можна скласти і розв'язати рівняння руху (2) з урахуванням первинних дифракційних хвиль для  $t < 2H/a$ . Система хвиль, що утворюється при взаємодії плоскої хвилі з нерухомим прямокутним тілом, залежить від часу, співвідношення сторін  $s = L/H$ , кута падіння  $e$ .

Для кінцевого опису поступального руху тіла отримано звичайне диференціальне рівняння зі змінними коефіцієнтами:

$$nu_*'' + 2l_1(\tau)u_*' + 4C_*u_* = [2l_0(\tau) - \chi]u_+' + \nu u_+, \quad (7)$$

$$n = \rho H^2 / m.$$

Величини  $\nu$  і  $\chi$  визначають порядок проходження падаючою хвилею кутів тіла впродовж часу  $t < 2H/a$  і радіус циліндричних хвиль, які при цьому утворюються і визначаються згідно з [8].

Значення індексу при  $C_0$  показує, які кути тіла взаємодіють в даний момент з падаючою плоскою хвилею.

Опис довжини ділянок більшої сторони прямокутного тіла, де відбуваються реакції плоских (падаючих та відбитих) має вигляд

$$l_0(\tau) = \tau H(1 / \cos e - 1)$$

при  $0 < \tau \leq 2$ ,  $s \cos e > 1$  і при  $0 < \tau \leq 2s \cos e$ ,  $s \cos e < 1$ ;

$$l_0(\tau) = 2H[(s - \tau) + s \cos e] \text{ при } 2s \cos e < \tau \leq s[1 + \cos e];$$

$$l_0(\tau) = 0 \text{ при } s(1 + \cos e) < \tau \leq 2 \quad (\tau = at / H).$$

Опис довжини ділянок плоских хвиль на більшій стороні тіла такий:

$$l_1(\tau) = 2H(s - \tau) \text{ при } \tau \leq s,$$

$$l_1(\tau) = 0 \text{ при } \tau > s.$$

Лінійні величини  $u_+$ ,  $u_*$ ,  $l_0$ ,  $l_1$  віднесені до половини меншої сторони прямокутника  $H$  і далі вважаються безрозмірними. Початкові умови рівняння (7) визначаються співвідношеннями (3).

Для врахування особливостей сейсмічної хвилі для даної задачі швидкість поширення хвилі  $c(t)$  була задана в такому вигляді [9]:

$$c(t) = u_m \exp(-at) \sin(\omega t). \quad (8)$$

Для розрахунку частоти  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  в залежності від маси заряду, що підривається, та довжини заряду були використані експериментальні дані [7]:

$$T = k_p Q_l^{1/6} (0,01l + 1), \quad (9)$$

де  $k_p$  – експериментальний коефіцієнт, що враховує властивості породи;  $Q_l$  – лінійна маса скважинного заряду;  $l$  – довжина заряду.

Рівняння (7) розв'язувалось чисельно методом Рунге–Кутта 4-го порядку точності. Розрахунки проводились для кута між віссю  $x$  і фронтом падаючої хвилі  $e = \pi/2$  та відношення поперечної і повздовжньої хвилі  $\gamma = 0,5$ , що

відповідає суглинку. Параметри падаючої хвилі розраховувались для відстані  $r = 1000$  м від епіцентру вибуху, вибухова речовина – тротил.

На рис. 1 зображені залежності переміщення основи будівлі від часу при вибуху зарядів різної маси: 1 –  $Q = 1000$  кг; 2 –  $Q = 100$  кг; 3 –  $Q = 20$  кг, за допомогою яких можна простежити вплив падаючої хвилі на основу фундаменту. З аналізу рисунку випливає, що чим більша маса заряду, що підривається, тим більша амплітуда і період коливань, але менша частота. Слід відмітити, що на власні коливання основи будівлі накладаються коливання падаючої хвилі, які через час  $\tau = 1$  с згасають. На рисунку видно також, що періоди власних коливань будівлі при різних параметрах вибуху не збігаються з періодами сейсмічних коливань, що є позитивним ефектом з точки зору сейсмостійкості споруди, оскільки в даному випадку не може виникнути резонансу.

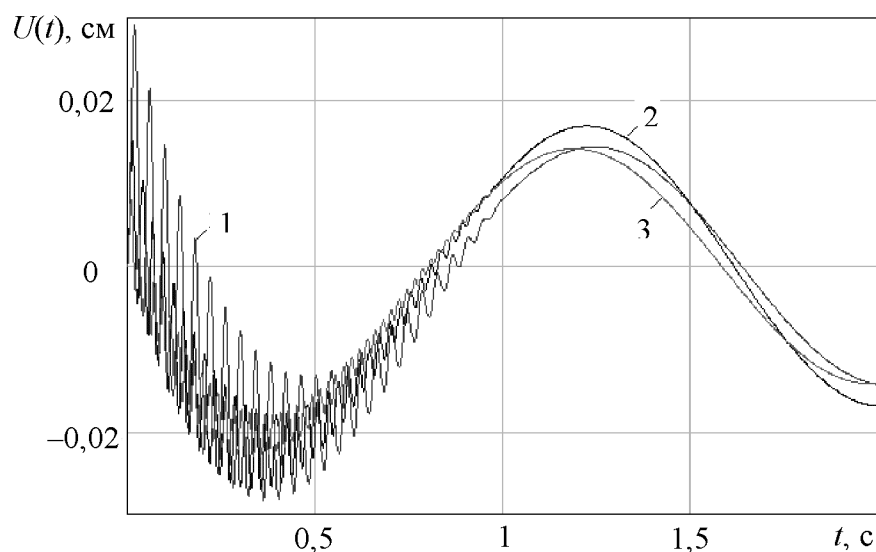


Рис. 1. Залежність переміщення основи будівлі від часу при вибуху зарядів різної маси: 1 –  $Q = 1000$  кг; 2 –  $Q = 100$  кг; 3 –  $Q = 20$  кг

На рис. 2 наведені залежності переміщення основи будівлі від часу для різних періодів коливань  $T$  падаючої хвилі: 1 – при вибуху заряду масою  $Q = 1000$  кг ( $T = 0,4$  с); 2 – при вибуху  $Q = 1,75 \cdot 10^5$  ( $T = 0,8$  с); 3 – землетрусу з періодом  $T = 1,6$  с. З рисунка випливає, що зі значним збільшенням періоду коливань (маси заряду) вплив падаючої хвилі на основу будівлі суттєво збільшується. Період власних коливань основи будівлі збігається з періодом коливань сейсмічної хвилі, за рахунок чого різко збільшується амплітуда власних коливань основи будівлі, що викликає явище резонансу. Відзначимо також, що амплітуда коливань, яка відповідає масовому вибуху, в даному випадку є більшою за амплітуду коливань основи будівлі під час землетрусу з періодом  $T = 1,6$  с.

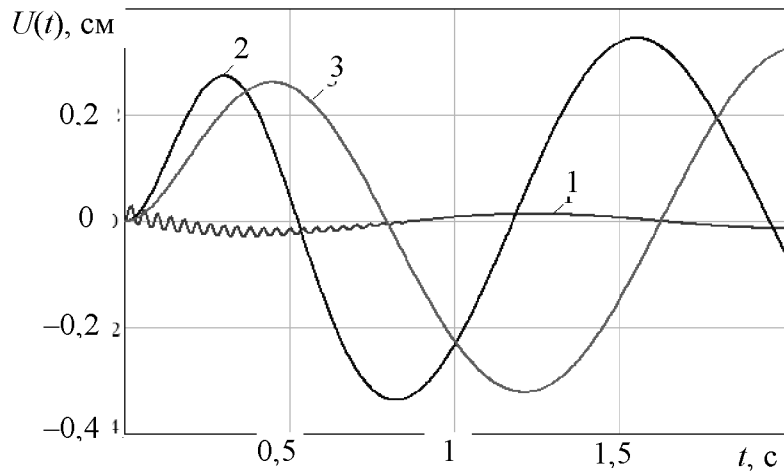


Рис. 2. Залежності переміщення основи будівлі від часу для різних періодів коливань падаючої хвилі: 1 – при вибуху заряду масою  $Q = 1000$  кг ( $T = 0,4$  с); 2 – при вибуху заряду масою  $Q = 10^5$  кг ( $T = 0,8$  с); 3 – землетрусу з періодом  $T = 1,6$  с

Залежності переміщення основи будівлі від часу для різних лінійних розмірів будівлі: 1 –  $s = 1$ ; 2 –  $s = 2$ ; 3 –  $s = 3$  показані на рис. 3. На рисунку видно, що вплив падаючої хвилі на коливання основи будівлі змінюється в залежності від співвідношення сторін останньої. Зі збільшенням  $s$  амплітуда коливань, що накладаються на власні коливання основи будівлі, зменшується разом з часом їх впливу. Очевидно, що менш сейсмостійкими є будівлі з основою квадратної форми, а найбільш стійкими – будівлі з основою прямокутної форми, коли довжина однієї сторони перевищує довжину іншої.

На рис. 4 зображені залежності переміщення основи будівлі від часу для різних інерційних властивостей будівлі: 1 –  $n = 4$ ; 2 –  $n = 2$ ; 3 –  $n = 1$ . На рисунку показано, що частота і амплітуда власних коливань основи будівлі обернено пропорційна масі тіла. При розгляданні дифракції хвилі, що падає на абсолютно жорстку основу, виявлено, що зі збільшенням маси основи зменшується її амплітудно-частотний спектр.

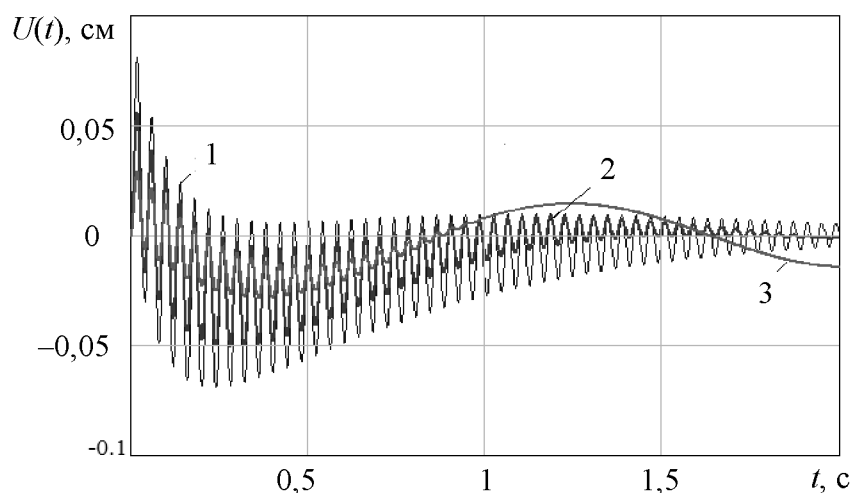


Рис. 3. Залежності переміщення основи будівлі від часу для різних лінійних розмірів будівлі: 1 –  $s = 1$ ; 2 –  $s = 2$ ; 3 –  $s = 3$

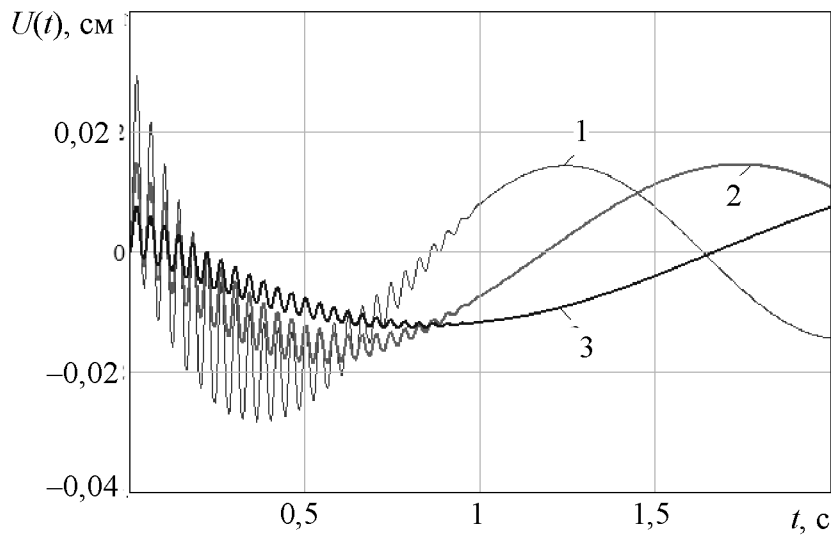


Рис. 4. Залежності переміщення основи будівлі від часу для різних інерційних властивостей будівлі: 1 –  $n = 4$ ; 2 –  $n = 2$ ; 3 –  $n = 1$

**Висновки.** Описано методику чисельного моделювання взаємодії сейсмовибухової хвилі з прямокутним фундаментом об'єкта, що охороняється. Досліджено вплив амплітудно-частотного спектра сейсмовибухової хвилі, геометричних та інерційних параметрів основи будівлі на коливальний процес споруди, що охороняється. В результаті дослідження встановлено, що зі значним збільшенням періоду коливань (збільшенням маси заряду), період власних коливань основи будівлі збігається з періодом коливань сейсмічної хвилі, за рахунок чого різко збільшується амплітуда власних коливань основи будівлі, що викликає явище резонансу.

Результати цієї роботи можуть бути використані для розрахунку сейсмостійких параметрів вибухових робіт з метою забезпечення сейсмостійкості об'єктів, що охороняються. Напрямок подальших досліджень – розроблення рекомендацій щодо визначення параметрів вибухових робіт для конкретних ґрунтів та різних типів застосовуваних вибухових речовин.

1. *Кауфман Б. Д.* Учет нагрузок / Б. Д. Кауфман, С. Г. Шульман // Сейсмические воздействия на гидротехнические и энергетические сооружения. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

2. *Бирбраер А. Н.* Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А. Н. Бирбраер, С. Г. Шульман. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.

3. *Кириллов А. П.* Взаимодействие фундаментов сооружений электростанций с основанием при динамических нагрузках / А. П. Кириллов, В. В. Крылов, А. Е. Саргсян. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 354 с.

5. *Хачиян Э. Е.* Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости / Э. Е. Хачиян, В. А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1981. – 204 с.

6. *Хлевнюк Т. В.* Підвищення надійності оцінки сейсмобезпеки будівель різного технічного стану при техногенних вибухах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.03 «Відкрита розробка корисних копалин» / Т. В. Хлевнюк. – К., 2009. – 23 с.

7. *Бойко В. В.* Оценка сейсмобезопасности сооружений при воздействии на них взрывных волн с учетом их спектральных характеристик / В. В. Бойко, А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2008 – № 16. – С. 3–13.

8. *Рилько М. А.* О движении в упругой среде жесткого прямоугольного тела под действием плоской волны / М. А. Рилько // Механика твердого тела. – 1977. – № 1. – С. 158–164.

9. *Денисюк И. И.* Управление сейсмозрывным импульсом при строительстве в структурно-неустойчивых грунтах / И. И. Денисюк, В. И. Рогожникова // Применение энергии взрыва на земляных работах. – 1979. – С. 195–202.