

## УДК 622.245.1

Ю. П. СТАРОДУБ<sup>1</sup>, Б. Є. КУПЛІВОВСЬКИЙ<sup>2\*</sup>, Т. Б. БРИЧ<sup>2</sup>, В. І. ПРОКОПИШИН<sup>2</sup>,  
О. П. ОЛЕЩУК<sup>2</sup>, Є. І. ОЛЕЩУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, Львів, Україна, 79000

<sup>2\*</sup> Відділ сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, вул. Ярославенка, 27, Львів, Україна, 79011, тел. +38(032)2706100, e-mail: tb@mail.lviv.ua

## МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСНОВ ІНЖЕНЕРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ОЦІНКИ СЕЙСМІЧНОГО ВПЛИВУ

**Мета.** Метою проведеної роботи була оцінка зміни передаточної характеристики сейсмічного середовища за додаткового навантаження на нього масивних інженерних конструкцій. Такий аналіз дасть змогу точніше оцінити характеристики осадкових товщ під час досліджень передаточних характеристик середовища під інженерними спорудами вже на етапі проектування самих конструкцій. **Методика.** Частотну характеристику середовища отримано розв'язанням прямої динамічної задачі сейсміки. Для вирішення цієї задачі та розрахунку напружено-деформованого стану середовища використовувався метод скінчених елементів. Цінність цього методу математичного моделювання полягає в можливості проводити розрахунки для середовищ із складною геометричною будовою та різноманітними включеннями. Задаючи сигнал у вигляді, близькому до дельта імпульсу, отримуємо відклик середовища у повному можливому діапазоні частот коливання моделі, без додаткової обробки вхідних та вихідних сигналів. **Результати.** Здійснений розрахунок напружено-деформованого стану осадкового шару під великими інженерними конструкціями. Змодельоване хвильове поле у середовищі. Розрахунок напружено-деформованого стану осадкового шару та моделювання хвильового поля для цього середовища проводилося для трьох моделей: перша – модель осадкового шару без інженерних конструкцій; друга та третя моделі – те саме середовище з розміщеними на них інженерними конструкціями з основою фундаменту 46 м та 86 м відповідно. Розраховано передаточну характеристику осадкового шару для трьох моделей. Проведене моделювання показало, що передаточна характеристика середовища суттєво змінюється залежно від навантаження, яке викликане спорудами. **Наукова новизна.** Показаний підхід дає змогу розрахувати передаточну характеристику осадкового шару, яка характеризуватиме середовище після зміни напружено-деформованого стану, математичними методами, не проводячи інструментальних досліджень. **Практична значущість.** Запропонована методика дає можливість оцінювати передаточну характеристику сейсмічного середовища та зміну її на етапі проектування складних конструкцій і вносити необхідні виправлення вже на цьому етапі.

*Ключові слова:* математичне моделювання, хвильове поле, пряма задача сейсміки, метод скінчених елементів, напружено-деформований стан, амплітудно-частотна характеристика.

### Вступ

Сейсмічна небезпека є об'єктивною характеристикою ділянки території, яка описує рівень загрози виникнення на ній сильних землетрусів. Сейсмічна небезпека залежить від природних умов ділянки: відстані до вогнищевих зон, параметрів максимальних землетрусів, здатних реалізуватися в цих зонах, їхньої повторюваності в часі, місцевих ґрунтових умов, рельєфу, наявності розломних тектонічних структур, спектрального складу коливань тощо. Знання параметрів сейсмічної небезпеки необхідне для ефективної організації сейсмічного захисту усіма державними органами, суб'єктами господарювання, власниками будинків і споруд [Кендзера О. В., 2015].

Сейсмічний ризик для населення і економіки країни визначається рівнем природної сейсмічної небезпеки території та уразливістю до сейсмічних впливів об'єктів, розташованих на її території. Парадокс полягає у тому, що на територіях з порівняно низьким рівнем природної сейсмічної

небезпеки, до яких належить платформна частина території України, більшість споруд проектують не сейсмостійкими, внаслідок чого вони є незахищеними (сейсмічно уразливими) від нечастих, але потенційно можливих, сейсмічних впливів. З іншого боку, через низьку повторюваність землетрусів, на таких територіях є мало реальних даних про поведінку ґрунтів в основі споруд за можливих місцевих землетрусів. Як наслідок, сейсмічний ризик слабко сейсмічних територій і встановлених на них техногенно- і екологічнонебезпечних об'єктів є достатньо високим [Старостенко В. І., 2006].

Під час проектування сейсмостійких споруд виникає необхідність оцінити вплив ґрунтових умов на майданчику для запобігання співпадінню власних резонансних частот конструкцій з резонансними частотами ґрунтів. Під резонансними властивостями ґрунтів розуміють їхню здатність до суттєвого підсилення сейсмічних коливань на певних частотах [Кендзера О. В., 2010].

На етапі розроблення проектів складних інженерних конструкцій, особливо на територіях із

вищим рівнем сейсмічної небезпеки території, необхідно використовувати усі доступні на цей час методики оцінки сейсмічності майданчика будівництва для зменшення рівня сейсмічного ризику.

У цій роботі модельні дослідження проводяться з використанням методу скінчених елементів – чисельного методу моделювання знаходження розв'язків інтегральних і частинних диференціальних рівнянь.

### Мета

Метою проведеної роботи була оцінка зміни передаточної характеристики сейсмічного середовища за додаткового навантаження на нього масивних інженерних конструкцій. Такий аналіз дасть змогу точніше оцінити характеристики осадових товщ під час дослідження передаточних характеристик середовища під інженерними спорудами вже на етапі проектування самих конструкцій.

### Методика

Для дослідження всіх можливих впливів на інженерні споруди під час моделювання в галузі інженерної сейсміки потрібно використовувати широкий частотний діапазон у межах частот від 0 до 200 Гц.

Під час розв'язання прямої задачі сейсмології необхідно використовувати математичні методи моделювання, які дають змогу враховувати різні види і форми неоднорідностей, а також враховувати складну будову осадового шару. В наш час загальноприйнятими вважаються два методи розрахунку шаруватих середовищ: матричний метод та метод скінчених елементів. У матричному методі середовище представляється ідеально пружними або поглинаючими горизонтально-шаруватими моделями.

Ці дослідження проводили, розв'язуючи пряму динамічну задачу сейсміки методом скінчених елементів (МСЕ). Цей метод математичного моделювання дає змогу проводити розрахунки для моделей, які є складні за своєю будовою. Під час розв'язання прямої динамічної задачі сейсміки цим методом не втрачається можливість врахування різних обмінних ефектів всередині моделі, а також можемо розраховувати моделі з різною складною геометричною будовою середовища та різноманітними включеннями.

Задаючи сигнал у вигляді, близькому до дельта-імпульсу, ми отримуємо відклик середовища у повному можливому діапазоні частот коливання моделі, без додаткової обробки вхідних та вихідних сигналів. Порівняння результатів інструментальних досліджень амплітудно-частотної характеристики осадового шару методом Накамури та результатів, отриманих математичним моделюванням з методики, яка використовується у цій роботі, показано у публікації [Вербицький С. Т., 2011].

### Основи розв'язання динамічної задачі теорії пружності методом скінчених елементів для моделювання хвильового поля у складнобудованих середовищах

Для моделювання хвильових полів у гірських породах складної структури розв'язуємо динамічну задачу теорії пружності, враховуючи нелінійні явища.

Суть МСЕ полягає в апроксимації неперервних величин кусково-неперервними функціями на скінченній кількості підобластей – елементах. Цими функціями можуть бути поліноми, що визначаються для кожного елемента зокрема. Порядок полінома залежить від форми елемента і кількості вузлів в елементі.

Використовуючи метод переміщень МСЕ поставлена задача зводиться до розв'язання системи

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = f, \quad (1)$$

де  $U$  – вектор переміщень у вузлах розбиття,  $f$  – сума концентрованих сил (джерел) і поверхневих сил на границях неоднорідних шарів, залежних від часу,  $K$  – матриця жорсткості системи,  $M$  – матриця мас [Bathe K.-J., 1982]. Рівняння (1) є математичним виразом другого закону Ньютона. Матриця  $C$  враховує загасання. Її можна визначити як суму:  $C = \alpha M + \beta K$ , по Релею, де коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  визначаються залежно від експериментальних даних [Bathe K.-J., 1982].

Доповнивши систему звичайних диференціальних рівнянь (1) початковими умовами, в яких задаються значення переміщень і швидкостей переміщень у початковий момент часу у вузлах розбиття, тобто уже дискретизовані початкові умови:

$$U_{t=0} = U_0, \quad \dot{U}_{t=0} = \dot{S}_0. \quad (2)$$

Маємо постановку динамічної задачі для МСЕ. [David V. Hutton, 2004; Singiresu S. Rao, 2004; Zhangxin Chen, 2005]. Для розв'язання системи (1)–(2) можна застосовувати різні підходи, такі як метод розкладу по власних формах або ітераційні методи, такі як методи центральних різниць, Хаболта, Ньюмарка або  $\Theta$ -метод Вілсона [Zienkiewicz O. C., 2005] або розроблені і апробовані авторами ітераційні схеми [Брич Т. Б., 2010; Купльовський Б. Є., 2010].

Розрахунок напружено-деформованого стану проводився на основі отриманих значень глобального вектора переміщень  $U$ .

Під час моделювання використовувалися лінійні трикутні елементи, які забезпечують можливість точніше моделювати різноманітні неоднорідності. Такі елементи задовольняють умови неперервності апроксимованої величини не лише у вузлах, як елементи вищих порядків, але й на ребрах. Крім того, ці елементи достатньо прості для того, щоб необхідне в процесі рахунку інтегрування провести аналітично і в програмі використовувати одержані вирази. Цей елемент має шість степенів свободи та характеризується густиною  $\rho$ , модулем Юнга  $E$  і коефіцієнтом Пуассона  $\nu$ , які можна перерахувати до значень швидкостей

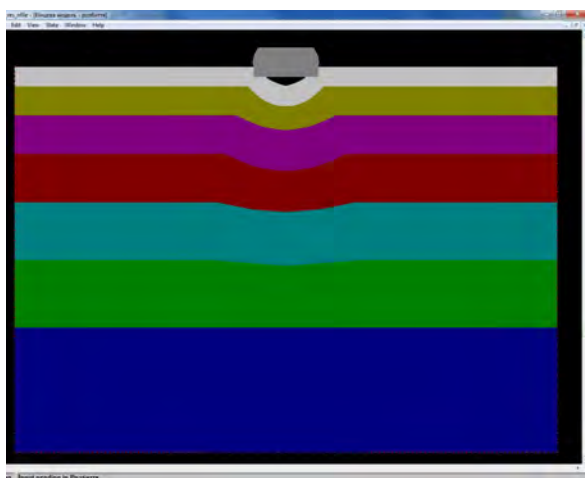
поздовжніх  $V_P$  і поперечних  $V_S$  хвиль за необхідністю по відомих формулах:

$$E = \frac{V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2) \rho}{V_P^2 - V_S^2},$$

$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}. \quad (3)$$

**Результати**

Використовуючи розроблену методику, проведено моделювання напружено-деформованого стану та хвильового поля для сейсмічного перерізу осадового шару ненавантаженого і навантаженого інженерними конструкціями (рис. 1).



**Рис. 1.** Модель середовища  
*Fig. 1. Environment's model*

На рис. 1 показана модель середовища, яка використовувалася у розрахунках. Розглядалася шарувата модель середовища з прогином глибиною 20 м. Оскільки по осі прогину середовище вважаємо однорідним – проводимо моделювання в умовах плоскої задачі перерізу середовища по площині YOX. Над прогином розглядалася конструкція, якою моделювалося побудову мосту. Матеріал конструкції мосту задавався такими характеристиками:  $E = 2,6935 \cdot 10^{10} \text{ н/м}^2$ ,  $\nu = 0,152$ ,  $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ . Характеристики шарів осадового шару, починаючи з верхнього, наведені в таблиці.

**Модель середовища  
Environment's model**

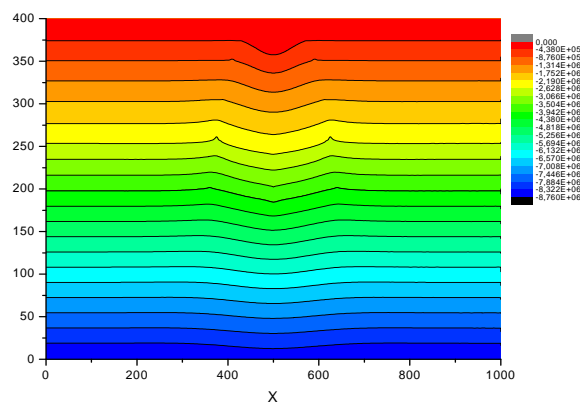
$dY$ (м)	$V_s$ (м/с)	$V_p$ (м/с)	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )
20	184	244	1670
30	214	284	1910
40	306	406	1890
50	351	466	1730
60	918	1220	2400
70	1715	2277	2500
130	2520	3350	2500

Початок відліку розміщено на глибині 400 м у лівому крайньому куті досліджуваної моделі, таким чином вільна поверхня відповідає координатам  $Y = 400$  (рис. 1).

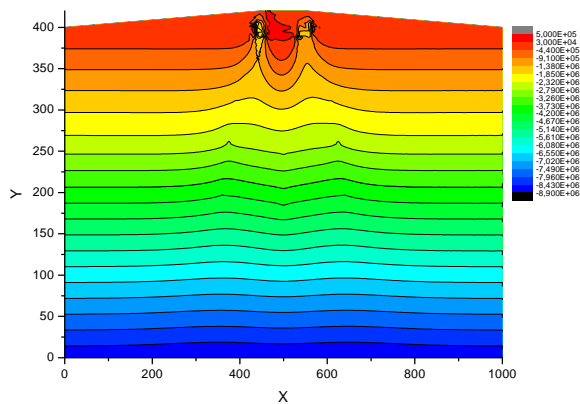
Проводилися дослідження для двох варіантів конструкцій з фундаментом 46 м (конструкція 1) і 86 м (конструкція 2). Розміри моделі – 1000×400 м. Для розбиття використовувалися лінійні трикутні елементи з максимальним лінійним розміром 5 м.

Джерело моделювалося у вигляді плоскої хвилі з глибини, імітуючи  $\delta$ -імпульс. Приймачі розміщувалися як на вільній поверхні досліджуваного середовища, так і на глибині контакту фундаменту конструкції зі середовищем – для можливості дослідження зміни спектральних характеристик середовища без і з побудованими конструкціями.

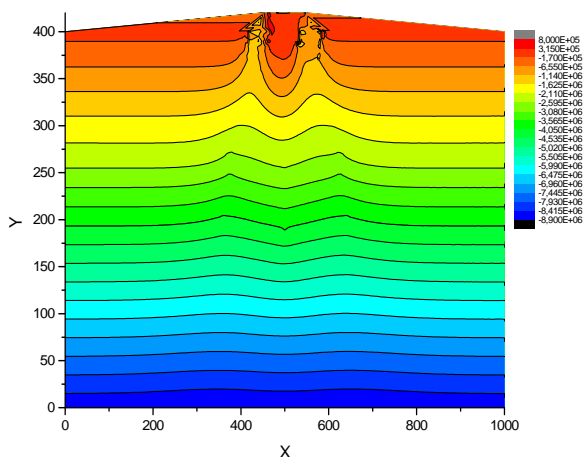
На рис. 2–4 показані розрахунки напружено-деформованого стану середовища ненавантаженого і навантаженого конструкціями. На графіках показано тільки нормальні напруження  $\sigma_{yy}$  для оцінювання зміни якісної картини напружень, які відбуваються у середовищі за зміни навантажень на нього конструкціями.



**Рис. 2.** Напруження  $\sigma_{yy}$  для моделі, ненавантаженої конструкцією  
*Fig. 2. Stress  $\sigma_{yy}$  in the unloaded model*

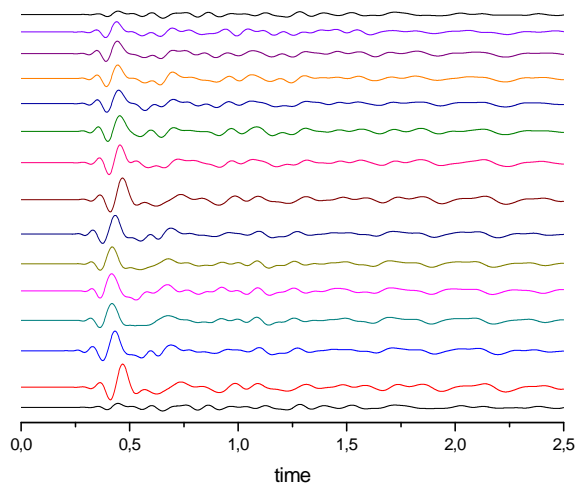


**Рис. 3.** Напруження  $\sigma_{yy}$  для моделі, навантаженої конструкцією 1  
*Fig. 3. Stress  $\sigma_{yy}$  in the model loaded with structure 1*



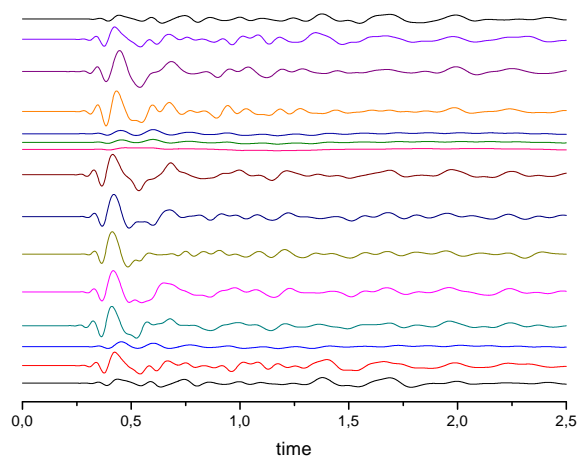
**Рис. 4.** Напруження  $\sigma_{yy}$  для моделі навантаженої конструкцією 2  
**Fig. 4.** Stress  $\sigma_{yy}$  in the model loaded with structure 2

На рис. 5–7 показана вертикальна компонента переміщень  $U_y(t)$  хвильового поля зареєстрованого на вільній поверхні осадового шару: ненавантаженого конструкціями (рис. 5), навантаженого конструкцією 1 (рис. 6), навантаженого конструкцією 2 (рис. 7). Траси реєструються на вільній поверхні в точках з координатами  $x = 780, 670, 550, 530, 515, 500, 485, 470, 450, 440, 430, 410, 390, 330, 220$  – знизу догори на рисунках.

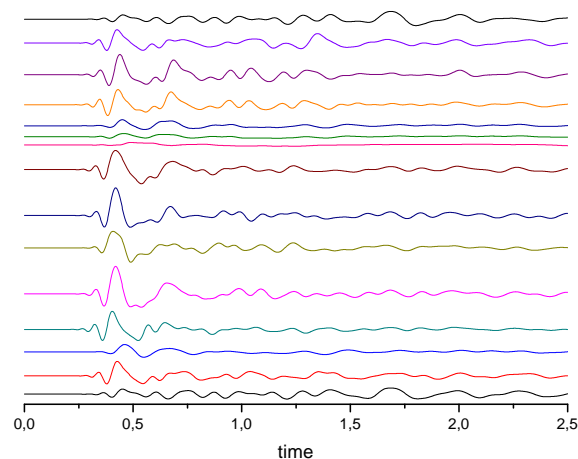


**Рис. 5.** Хвильове поле  $U_y(t)$  на поверхні осадового шару  
**Fig. 5.** The wave field  $U_y(t)$  on the surface of the sedimentary layer

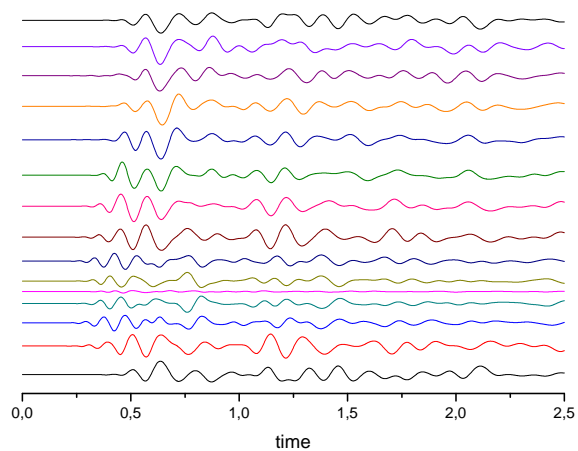
На рис. 8–10 показана горизонтальна компонента переміщень  $U_x(t)$  хвильового поля зареєстрованого на вільній поверхні осадового шару: ненавантаженого конструкціями (рис. 8), навантаженого конструкцією 1 (рис. 9), навантаженого конструкцією 2 (рис. 10).



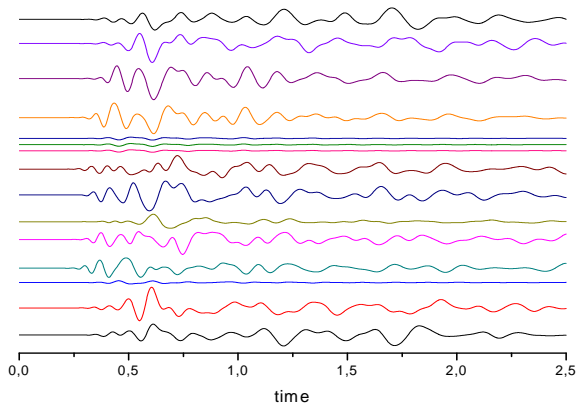
**Рис. 6.** Хвильове поле  $U_y(t)$  на поверхні (конструкція 1)  
**Fig. 6.** The wave field  $U_y(t)$  on the surface (construction 1)



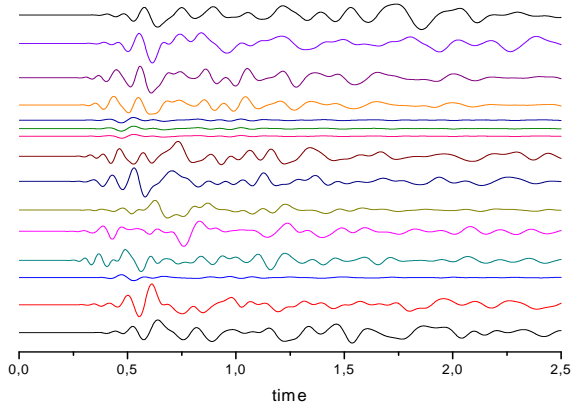
**Рис. 7.** Хвильове поле  $U_y(t)$  на поверхні (конструкція 2)  
**Fig. 7.** The wave field  $U_y(t)$  on the surface (construction 2)



**Рис. 8.** Хвильове поле  $U_x(t)$  на поверхні осадового шару  
**Fig. 8.** The wave field  $U_x(t)$  on the surface of the sedimentary layer

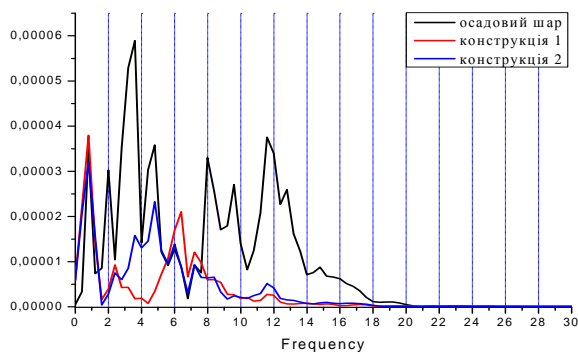


**Рис. 9.** Хвильове поле  $U_x(t)$  на поверхні (конструкція 1)  
**Fig. 9.** The wave  $U_x(t)$  field on the surface (construction 1)

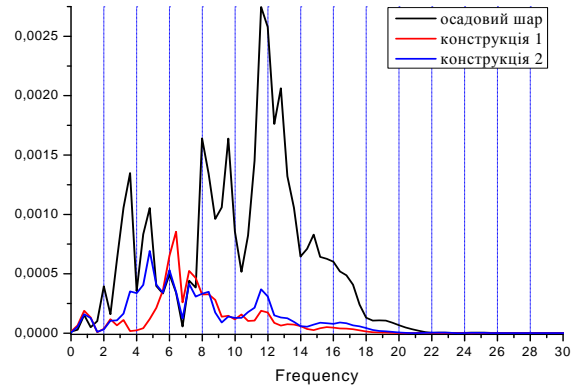


**Рис. 10.** Хвильове поле  $U_x(t)$  на поверхні (конструкція 2)  
**Fig. 10.** The wave field  $U_x(t)$  on the surface (construction 2)

На рис. 11–16 показано розрахунки амплітуди частотного спектра вертикальної та горизонтальної компоненти переміщень, швидкості та прискорення для перерізу осадового шару ненавантаженого і навантаженого інженерними конструкціями. Розрахунок проводився методом швидкого перетворення Фур'є (FFT).

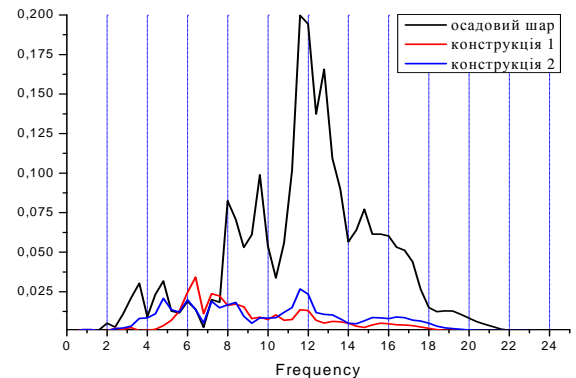


**Рис. 11.** Частотна характеристика середовища FFT ( $U_y(t)$ )  
**Fig. 11.** Frequency response of environment FFT ( $U_y(t)$ )

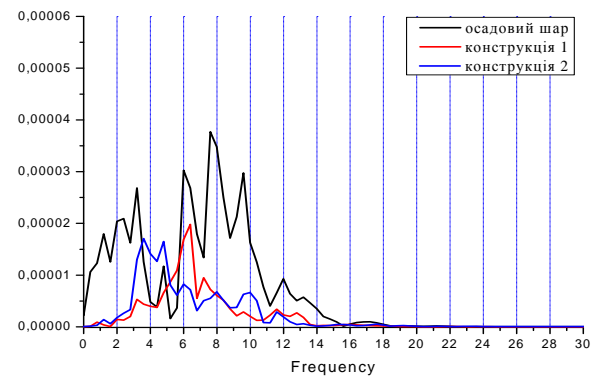


**Рис. 12.** Частотна характеристика середовища FFT ( $U'_y(t)$ )  
**Fig. 12.** Frequency response of environment FFT ( $U'_y(t)$ )

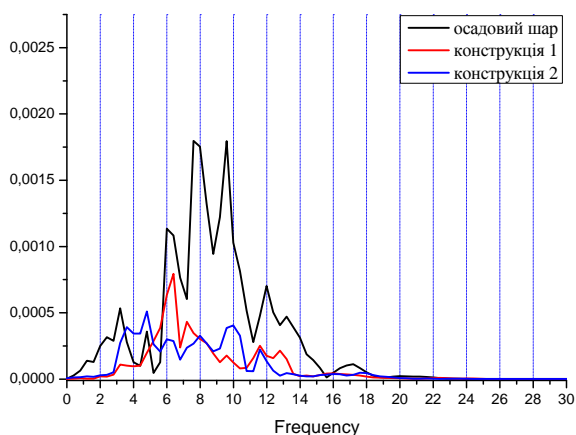
Для інженерних досліджень інформативнішими є спектри акселерограм, оскільки, аналіз прискорень дає більшу інформацію про можливі сейсмічні впливи на конструкції. На рис. 13 і 16 показані графіки вертикальної і горизонтальної компонент прискорення амплітудно-частотних характеристик відповідно осадового шару і двох конструкцій.



**Рис. 13.** Частотна характеристика середовища FFT ( $U''_y(t)$ )  
**Fig. 13.** Frequency response of environment FFT ( $U''_y(t)$ )

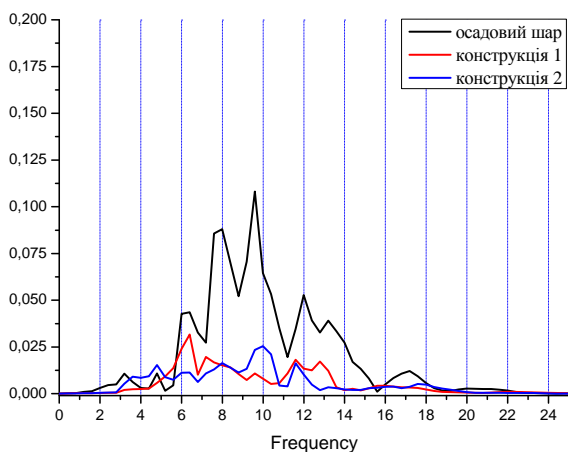


**Рис. 14.** Частотна характеристика середовища FFT ( $U_x(t)$ )  
**Fig. 14.** Frequency response of environment FFT ( $U_x(t)$ )



**Рис. 15.** Частотна характеристика середовища FFT ( $U'x(t)$ )

**Fig. 15.** Frequency response of environment FFT ( $U'x(t)$ )



**Рис. 16.** Частотна характеристика середовища FFT ( $U''x(t)$ )

**Fig. 16.** Frequency response of environment FFT ( $U''x(t)$ )

На графіку вертикальної компоненти видно чітку зміну зменшення підсилення коливань в області 8 і 12 Гц для середовища, яке навантажено конструкціями 1 і 2. Зміна геометрії конструкцій відобразилася на графіках в областях 6,5 і 12 Гц. Графіки спектра акселерограм горизонтальної компоненти показали менш різку зміну амплітуди порівняно з вертикальною компонентою. На графіку горизонтальної компоненти видно чітку зміну зменшення підсилення коливань в області 8 і 9,5 Гц для середовища яке навантажено конструкціями 1 і 2. Зміна геометрії конструкцій відобразилася на графіках в областях 6,5 і 10 Гц.

### Наукова новизна і практична значущість

Показаний підхід дає змогу розрахувати передаточну характеристику осадового шару, яка характеризуватиме середовище після зміни напружено-деформованого стану математичними методами, не проводячи інструментальних досліджень.

Ця методика дає можливість оцінювати передаточну характеристику сейсмічного середовища та зміну її на етапі проектування складних конструкцій.

### Висновки

Здійснений розрахунок напружено-деформованого стану осадового шару під інженерними конструкціями. Змодельоване хвильове поле у середовищі. Розрахунок напружено-деформованого стану осадового шару та моделювання хвильового поля для цього середовища проводився для трьох моделей: перша – модель осадового шару ненавантажена інженерними конструкціями; друга – модель осадового шару навантажена інженерною конструкцією з основою фундаменту 46 м; третя – модель осадового шару навантажена інженерною конструкцією з основою фундаменту 86 м. Розраховано передаточну характеристику осадового шару для трьох моделей. Проведене моделювання показало, що передаточна характеристика середовища суттєво змінюється залежно від навантаження, яке діє на нього.

### Література

- Бате К., Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
- Брич Т. Б., Математичне моделювання впливу процесу поглиблення нафтогазової свердловини на напружено-деформований стан гірського масиву / Т. Б. Брич // Вісник Львівського університету. Серія фізична – 2010. – № 45. – С. 135–141.
- Вербицький С. Т., Метод Накамури та метод скінчених елементів при дослідженні АЧХС. / С. Т. Вербицький, Т. Б. Брич, Н. І. Рожок, Купльовський Б. Є. // “Геодинаміка”. – 2011. – № 2(11). – С. 38–40.
- Ильющин А. А., Механика сплошной среды / А. А. Ильющин. – М.: Изд-во Московского университета, 1978. – 288 с.
- Кендзера О. В., Сейсмічна небезпека і захист від землетрусів (практичне впровадження розробок Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України) / О. В. Кендзера // Вісник Національної академії наук України. – 2015. – № 2. – С. 44–57. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu\\_2015\\_2\\_10.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2015_2_10.pdf).
- Кендзера О., Врахування амплітудно-частотних характеристик ґрунтової товщі при сейсмічному мікрорайонуванні будівельного майданчика в м. Одесі / О. Кендзера, Ю. Семенова // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія Геологія. – 2010. – № 2(49). – С. 10–13.
- Купльовський Б. Є., Моделювання хвильового поля для складних сейсмічних розрізів / Б. Є. Купльовський // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – 2010. – №. 45. – С. 141–150.
- Седов Л. И., Механика сплошной среды: 2 т. / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1984. – 560 с.

- Старостенко В. І., Сейсмологічні дослідження для Чорнобильської АЕС / В. І. Старостенко, О. В. Кендзера, В. Д. Омельченко, С. Т. Вербицький, Ю. Т. Вербицький, Т. А. Амашукелі, Ю. В. Лісовий, Н. І. Рожок // Національна академія наук України — Чорнобілю: зб. наук. пр. / НАН України. Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського; Редкол.: О. С. Онищенко (гол.) та ін. — К., 2006. — Режим доступу: <http://www.nbu.gov.ua/books/2006/chernobyl/svi.pdf>
- Тимошенко С. П., Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер/ — М.: Наука, 1975. — 576 с.
- Bathe K.-J., Finite element procedures in engineering analysis / K.-J. Bathe. — New Jersey, 1982, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 738 p.
- David V. Hutton, Fundamentals of Finite Element Analysis / David V. Hutton. — New York: McGraw-Hill, 2004, 495 p.
- Singiresu S. Rao, The Finite Element Method in Engineering. Fourth edition / Singiresu S. Rao // Miami, 2004, Elsevier Science & Technology Books, 664 p.
- Zienkiewicz O. C., The Finite Element Method for solid and structural mechanics. Six edition. Vol. 1–3 / O. C. Zienkiewicz., R. L. Taylor // Oxford, 2005, Elsevier Butterworth-Heinemann, 632 p.
- Zhangxin Chen, Finite Element Methods and Their Applications / Zhangxin Chen // Berlin, 2005, Springer, 411 p.

Ю. П. СТАРОДУБ<sup>1</sup>, Б. Е. КУПЛЬОВСКИЙ<sup>2\*</sup>, Т. Б. БРЫЧ<sup>2</sup>, В. И. ПРОКОПЫШЫН<sup>2</sup>, О. П. ОЛЕЩУК<sup>2</sup>,  
С. И. ОЛЕЩУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, ул. Клепаровская, 35, Львов, Украина, 79000

<sup>2\*</sup> Отдел сейсмичности Карпатского региона, Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, ул. Ярославенка, 27, Львов, Украина, 79011, тел. +38(032)2706100, E-mail: tb@mail.lviv.ua

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

**Цель.** Целью проведенной работы является оценка изменения передаточной характеристики сейсмической среды при дополнительной нагрузке мощными инженерными конструкциями. Такой анализ позволяет более точно оценивать характеристики осадочных слоев при исследовании передаточных характеристик среды под инженерными сооружениями уже на этапе проектирования. **Методика.** Частотные характеристики среды было получено путем решения прямой динамической задачи сейсмики. Для решения этой задачи и расчета напряженно-деформированного состояния среды использовался метод конечных элементов. Ценность этого метода математического моделирования в том, что он позволяет проводить расчеты для сложных геометрически сред и с разнообразными включениями. Используя сигнал в виде, близком к дельта импульсу, мы получаем отзыв среды в полном диапазоне частот колебаний модели, без дополнительной обработки входных и выходных сигналов. **Результаты.** Проведен расчет напряженно-деформированного состояния осадочного слоя под большими инженерными конструкциями. Смоделировано волновое поле в среде. Расчет напряженно-деформированного состояния осадочного слоя и моделирования волнового поля для этой среды проводилось для трех моделей: первая – модель осадочного слоя без инженерных конструкций; вторая и третья модели – та же среда с размещенными на них инженерными конструкциями с основанием фундамента 46 м и 86 м соответственно. Рассчитано передаточную характеристику осадочного слоя для трех моделей. Проведенное моделирование показало, что передаточная характеристика среды существенно меняется в зависимости от нагрузки, вызванной сооружениями. **Научная новизна.** Данный подход позволяет рассчитать передаточную характеристику осадочного слоя, которая будет характеризовать среду после изменения напряженно-деформированного состояния, математическими методами, не проводя инструментальных исследований. **Практическая значимость.** Эта методика позволяет оценивать передаточную характеристику сейсмической среды и изменение ее на этапе проектирования сложных конструкций, а также вносить необходимые исправления уже на этом этапе.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, волновое поле, прямая задача сейсмики, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, амплитудно-частотная характеристика.

Yu. P. STARODUB<sup>1</sup>, B. Ye. KUPLOVSKYI<sup>2\*</sup>, T. B. BRYCH<sup>2</sup>, V. I. PROKOPYSHYN<sup>2</sup>, O. P. OLESHCHUK<sup>2</sup>,  
Ye. I. OLESHCHUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lviv state university of life safety, 35 Kleparivska stre., Lviv, Ukraine, 79000

<sup>2\*</sup> Department of Carpathian Region's Seismicity of Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 27 Yaroslavenka street, Lviv, Ukraine, 79011, tel. +38 (032) 2706100, e-mail: tb@mail.lviv.ua

#### MODELING STRESS-STRAIN STATE BASES OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS FOR EVALUATION OF SEISMIC HAZARD

**Purpose.** The aim of this work was to evaluate changes in the transfer characteristics of the seismic environment with additional loading of massive engineering structures. This analysis will help to more accurately assess the characteristics of sedimentary layer in the study of the transfer characteristics of

environment under the engineering structures already at the design stage of construction. **Methodology.** Frequency characteristic of environment was obtained by solving the direct dynamic seismic problem. To solve this problem and calculate the stress-strain state of the environment was used finite element method. The value of this method of mathematical modeling is the ability to make calculations for environments with complex geometrical structure and various inclusions. Setting a signal as close to the delta impulse, we receive environment response in the full possible frequency range of fluctuations in the models, without additional processing input and output signal. **Results.** Calculation of stress-strain state of the sedimentary layer under the large engineering structures was carried out. Wave field in the surrounding environment was modeled. Calculation of stress-strain state of the sedimentary layer and modeling of wave field for this environment was conducted for the three models: the first – the model of the sedimentary layer without engineering structures; the second and third model – the same environment with placed engineering structures with base of the foundation 46 m and 86 m, respectively. Transfer characteristics of sedimentary layer of the three models were calculated. The conducted simulation showed that the transfer characteristic of environment changes significantly depending on the load caused by buildings. **Scientific innovation.** Showed approach allows us to calculate the transfer characteristics of the sedimentary layer that will characterize the environment after the change of the stress-strain state, only using mathematical methods without making instrumental studies. **Practical significance.** This technique allows to evaluate the transfer characteristics of the seismic environment and its change at the design stage of complex structures and make necessary corrections already at this stage.

*Key words: mathematical modeling, wave field, direct seismic problem, finite element method, stress-strain state, frequency response.*

#### REFERENCES

- Bate K., Wilson E. *Chislennye metody analiza i metod konechnykh jelementov* [Numerical methods of analysis and finite element method]. Moscow, 1982, *Strojizdat*, 448 p.
- Brych T. B. *Matematychni modeliuvannia vplyvu protsesu pohlyblennia naftohazovoi sverdllovyny na napruzhenodeformovanyi stan hirs'koho masyvu* [Mathematical modeling of the influence of deepening of oil and gas well on rock stress-strain state]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii fizychna*, 2010, No. 45, pp. 135–141.
- Verbytskyi S. T., Brych T. B., Rozhok N. I., Kuplovskiy B. Ye. *Metod Nakamury ta metod skinchenykh elementiv pry doslidzhenni AChKhS*. [Nakamura's technique and finite element method in solid amplitude-frequency response investigation]. *Geodynamic*, 2011, No. 2(11), pp. 38–40.
- Il'jushin A. A. *Mehanika sploshnoj sredy* [Continuum mechanics]. Moscow, 1978, *Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta*, 288 p.
- Kenzera O. V. *Seismichna nebezpeka i zakhyst vid zemletrusiv (praktychne vprovadzhennia rozrobok Instytutu heofizyky im. S.I. Subbotina NAN Ukrainy)* [Seismic hazard assessment and protection against earthquakes (Practical applications of developments of Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine)]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2015, No. 2, pp. 44–57. Available at: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu\\_2015\\_2\\_10.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/vnanu_2015_2_10.pdf).
- Kenzera O., Semenova Yu. *Vrakhuvannia amplitudno-chastotnykh kharakterystyk gruntovoi tovshchi pry seismichnomu mikroraiionuvanni budivelnoho maidanchyka v m. Odesi* [Considering of amplitude-frequency characteristics of soil thicker under seismic microzoning of building site in Odesa]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Serii Heolohiia*. 2010, No. 2(49), pp. 10–13.
- Kuplovskiy B. Ye. *Modeliuvannia khylovoho polia dlia skladnykh seismichnykh rozriziv* [Design of wave field for complicated arranged seismic cuts]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Serii fizychna*, 2010, No. 45, pp. 141–150.
- Sedov L. I. *Mehanika sploshnoj sredy. 2 t* [Continuum mechanics]. Moscow, 1984, *Nauka*, 560 p.
- Starostenko V. I., Kenzera O. V., Omelchenko V. D., Verbytskyi S. T., Verbytskyi Yu. T., Amashukeli T. A., Lisovyi Yu. V., Rozhok N. I. *Seismolohichni doslidzhennia dlia Chornobyl'skoi AES* [Seismological Investigation for Chernobyl NPP]. *Natsionalna akademiia nauk Ukrainy — Chornobyl'iu: Zbirnyk naukovykh prats. / NAN Ukrainy. Natsionalna biblioteka Ukrainy im. V. I. Vernadskoho*; Redkol.: O. S. Onyshchenko (hol.) ta in. Kyiv, 2006, Available at: <http://www.nbuv.gov.ua/books/2006/chernobyl/svi.pdf>.
- Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, 1975, *Nauka*, 576 p.
- Bathe K.-J., *Finite element procedures in engineering analysis*. New Jersey, 1982, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 738 p.
- David V. Hutton, *Fundamentals of Finite Element Analysis*. New York, 2004, McGraw-Hill, 495 p.
- Singiresu S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*. Fourth edition. Miami, 2004, Elsevier Science & Technology Books, 664 p.
- Zienkiewicz O. C., R. L. Taylor. *The Finite Element Method for solid and structural mechanics*. Six edition. Vol. 1–3. Oxford, 2005, Elsevier Butterworth-Heinemann, 632 p.
- Zhangxin Chen, *Finite Element Methods and Their Applications*. Berlin, 2005, Springer, 411 p.

Надійшла 15.03.2016 р.