

## ***Врахуванням впливу термічних ефектів на земну кору під Чорнобильською атомною електростанцією***

Стародуб Ю. П.<sup>1)</sup>, Б.Є. Купльовський<sup>2)</sup> Гончар Т.М.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

<sup>2)</sup> Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м.Київ, Україна

*Представлено підхід моделювання хвильового поля в сейсмо-геологічному розрізі з врахуванням температурного впливу на коливання в області досліджуваного об'єкту методом скінчених елементів. Проведено математичне моделювання сейсмічного хвильового поля в перетині земної кори в околі будівельної структури з метою вивчення впливу коливань та їх спектральних характеристик на інженерну споруду. За приклад взятий модельний перетин земної кори під Чорнобильською атомною електростанцією.*

*Ключові слова: математичне моделювання, сейсмічне хвильове поле, атомна електростанція.*

Міцність інженерних споруд значною мірою залежить від їх основи – осадової товщі земної кори, на якій розташовано забудову. Сейсмічні хвильові поля виникають і при необхідності реєструються в заданому спектральному діапазоні навколо інженерних об'єктів. Вплив неоднорідностей та розломів земної кори на результуюче поле може збільшувати його амплітудне значення в десятки разів, що може спричинити при неправильному уявленні про будову земної товщі непередбачені катастрофічні результати, особливо з впливом температурних ефектів. Аварії пов'язані із сейсмічністю, що відбуваються не тільки в сейсмо-небезпечних регіонах, зокрема, при наявності карстів, чи порожнин, які можуть заповнюватися підземними водами, вказують на практичну необхідність вивчення при цьому сейсмічних полів і їх впливів на інженерні споруди. Важливим методом таких досліджень є математичне моделювання хвильового поля, що зумовлене глибинною будовою земної кори в сейсмічному, інженерному, акустичному діапазонах та практичною недоступністю дослідних зразків для безпосереднього експериментального вивчення, особливо для таких еко-небезпечних об'єктів, якими є атомні станції.

Перевагою чисельного моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) є можливість вивчити сукупність полів напружень, деформацій і переміщень, а також їх зміну в часі для широкого класу неоднорідностей без суттєвих затрат на зміну алгоритму.

У даній роботі шляхом математичного моделювання хвильового поля МСЕ проводиться вивчення сейсмічного поля та особливостей його спектральних характеристик у геолого-геофізичному перетині в області інженерного об'єкту, яким є Чорнобильська атомна електростанція (ЧАЕС). З метою створення розрахункової моделі об'єкту спочатку задається розподіл значень пружних параметрів у півпросторі: швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль (модулів Юнга, коефіцієнтів Пуассона), густин, коефіцієнтів загасання поздовжніх і поперечних коливань у сейсмічному розрізі. Враховується вплив джерел можливих напружень і сил у півпросторі під будовою, вплив температурних джерел та граничні умови, які задаються для переміщень, деформацій та напружень у певних визначених на основі аналізу геологічних структур частинах моделі. Проводяться розрахунки поля спектрів можливих переміщень (деформацій, напружень) у моделі з візуалізацією отриманих результатів для їх аналізу та необхідної корекції шляхом зміни крайових умов (вхідних даних). Моделювання хвильового поля шляхом вирішення прямої динамічної задачі сейсміки МСЕ дозволяє в ра-

йоні ЧАЕС вивчити вплив динамічних параметрів, уточнити їх значення з врахуванням особливостей структури середовища, напружено-деформований стан земної кори, оцінити динамічні процеси у випадку можливих струшувань. Висновки про розподіл можливих коливань переміщень дають змогу спеціалістам з інженерної сейсміки вибрати відповідний метод підтримки, відновлення і необхідні перманентні заходи по усуненню небезпеки руйнування споруди.

Розвинутий скінчено-елементний підхід показує ефективність методології вивчення спектрів хвильових полів у випадку інженерних об'єктів, отримані результати виявляють у спектральних областях значний вплив прозорості перетинів для коливань в районі об'єктів у спектральному діапазоні до 100 Гц. Суть МСЕ полягає в апроксимації неперервних величин, якими є поля деформацій, напружень, кусково-неперервними функціями на скінченій кількості підобластей – елементів. Такими функціями є поліноми, що визначаються для кожного елемента і підбираються таким чином, щоб зберігалась неперервність апроксимованої ними величини на елементі. Вибір порядку полінома залежить від поставленої задачі і форми елемента, кількості вузлів в елементі. Тому ці функції називають функціями форми.

В даному випадку неперервні значення вектора переміщень апроксимуються дискретною моделлю, що будується на класі дискретно-неперервних функцій, визначених на скінченному числі елементів. Як дискретно-неперервні функції використовуються квадратичні поліноми, які забезпечують неперервність апроксимованих величин у вузлах розбиття. В результаті отримуємо скінчену систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно глобального вектора вузлових переміщень  $\vec{U}$  [1], яка в матричному представленні має вид

$$\mathbf{K}\vec{U} = \vec{F}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{K}$  – матриця жорсткості системи,  $\vec{F}$  – вектор вузлових сил. Вектор в правій частині рівняння можна записати як композицію декількох доданків:

$$\vec{F} = \vec{F}_V + \vec{F}_S + \vec{F}_\alpha, \quad (2)$$

де  $\vec{F}_V$  – об'ємні сили,  $\vec{F}_S$  – поверхневі сили і  $\vec{F}_\alpha$  – сили, що виникають у результаті теплового розширення. Виходячи з закону Гука в формулюванні [2]:

$$\vec{\sigma} = \mathbf{D} \vec{\varepsilon} - \vec{\varepsilon}^\alpha, \quad (3)$$

можемо записати

$$\vec{F}_\alpha = \int_V \mathbf{B}\mathbf{N}^T \mathbf{D}\vec{\varepsilon}^\alpha dV, \quad (4)$$

де  $\mathbf{D}$  – матриця пружних характеристик елемента,  $\mathbf{B}$  – диференціальний оператор, що описує залежність між напруженнями і деформаціями на елементі,  $\mathbf{N}$  – матриця функцій форми на елементі,  $\vec{\varepsilon}$  – вектор деформацій на елементі,  $\vec{\sigma}$  – вектор напружень на елементі,  $\vec{\varepsilon}^\alpha$  – вектор деформацій, викликаних зміною температури на елементі, який можна записати у вигляді

$$\vec{\varepsilon}^\alpha = \alpha \cdot \Delta T \cdot \vec{\varepsilon}. \quad (5)$$

Тут  $\alpha$  – коефіцієнт температурного розширення на елементі,  $\Delta T$  – зміна температури і  $\vec{\varepsilon}$  – вектор, який пов'язує температурне розширення на елементі з вузловими деформаціями. Інтегрування в (4) проводиться по елементу. Вектор переміщення формується внаслідок ство-

рення ансамблю по всьому досліджуваному регіоні.

Таким чином в рівнянні (1) враховуємо не лише об'ємні та поверхневі сили, але й сили, пов'язані з ефектами впливу зміни температури залежно від координат.

На основі принципу д'Аламбера інерційні і дисипативні сили розподілені по об'єму, отже можуть розглядатися як частина об'ємних сил [3]. Взавши до уваги інерційні дисипативні компоненти об'ємної сили у правій частині рівності (1), отримуємо рівняння руху в матричній формі для методу скінчених елементів

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}, \quad (6)$$

де  $\mathbf{M}$  – матриця мас системи елементів, а  $\mathbf{C}$  – матриця, яка враховує демпфування або загасання. Для інтегрування рівняння (6) по часу використовується ітераційна схема, розроблена авторами [4, 5, 6], яка забезпечує можливість моделювати хвильові поля в необхідному діапазоні частот. На основі розробленого алгоритму створено комплекс програм, яким проведено моделювання. Врахування сил, спричинених зміною температурного поля проводиться в залежності від заданого розподілу температури в залежності від координат.

Розглянемо задачу визначення переміщень, деформацій і напружень у межах лінійної теорії пружності навколо поперечної неоднорідності в масиві гірських порід, на який діють певні зовнішні сили (це сили в напрямку осі  $OX$ , які моделюють вплив зовнішнього середовища на розглядувану модель скінченого перерізу); середовище вважаємо однорідним вздовж осі  $OY$ . Розглядаємо вертикальний переріз середовища по площині  $XOZ$ , де вісь  $OZ$  напрямлена вглиб досліджуваного тіла, а  $OX$  співпадає з денною поверхнею середовища.

На (рис.1) подано геометричні розміри моделі розрізу земної кори під Чорнобильською атомною електростанцією з нанесеними динамічними сейсмічними характеристиками горизонтально-неоднорідних шарів.

Джерело – вертикальна сила з тривалістю 0,008 с діє на нижній границі півпростору, що моделює плоску хвилю, яка поширюється з глибини. Термічні впливи моделюються з врахуванням впливу температурних джерел та природного розподілу їх з глибиною [7]. Для району Чорнобильської АЕС названі зміни становлять залежність температури від глибини 2 град Цельсія на 100 м. Відповідно враховуються усереднені значення температури в пластах із зростанням глибини. Останнє призводить до впливів на розподіл деформацій і сил згідно формул (5) і (4) та забезпечується для розглянутого тут випадку неідеальної пружності усередненим значенням коефіцієнта температурного розширення на елементі  $\alpha \approx 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>.

На віддалі 600 м від краю моделі зображено виявлений у результаті сейсмічних досліджень розлом у земній корі під станцією: модельні товщина розлому – 10 м, протяжність – 140 м; характеристики розлому: швидкість поздовжніх хвиль – 2150 м/с, поперечних хвиль – 1610 м/с, густина – 2280 кг/м<sup>3</sup>. Приймачі розміщені на вільній границі по горизонталі з кроком 4 м. Здійснюємо розрахунки поля спектрів можливих переміщень (деформацій, напружень) у моделі з візуалізацією отриманих результатів для їх аналізу та необхідної корекції шляхом зміни крайових умов (вхідних даних). Моделювання хвильових полів шляхом вирішення прямої динамічної задачі сейсміки дає змогу в районі інженерної будови ЧАЕС вивчити вплив динамічних параметрів, уточнити їхнє значення з урахуванням особливостей структури середовища, напружено-деформований стан земної кори, оцінити динамічні процеси у випадку можливих сейсмічних струшувань та термічних впливів.

У випадку Чорнобильської атомної електростанції (рис. 1) дослідження виконано авторами у низькочастотному сейсмонебезпечному діапазоні [4].

Одержані результати числового моделювання та експериментальні дані засвідчують необхідність виконання детальнішого, (зокрема, у спектральній області) вивчення хвильового поля під складною в інженерному плані конструкцією. Щодо цього, з метою вивчення впливу структури земної кори під станцією на коливання на денній поверхні середовища

проведено числовий експеримент у випадку, коли плоска хвиля падає з глибини півпростору (із розміщенням джерел по лінії сейсмічного розрізу).

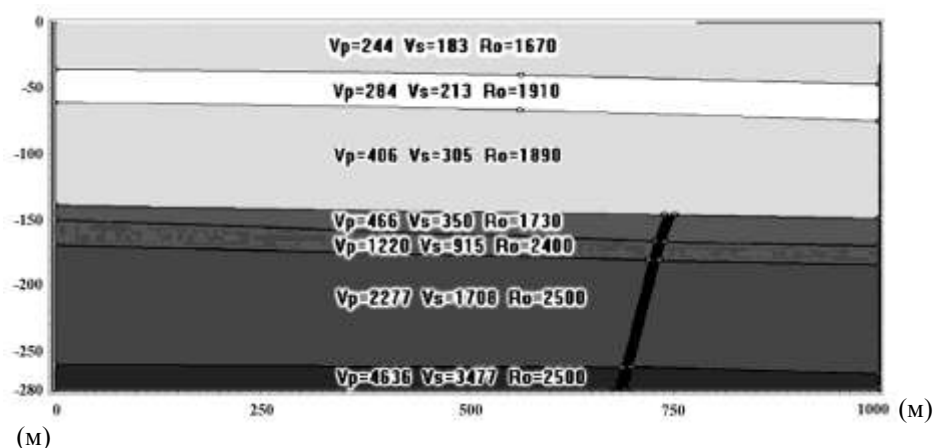


Рис.1. Розріз земної кори під Чорнобильською атомною електростанцією. По координатних осях показані розміри моделі, в метрах. На зображенні розрізу середовища позначені фізичні параметри середовища: швидкості поздовжніх ( $V_P$ , м/с) і поперечних ( $V_S$ , м/с) хвиль і густини шарів ( $R_0$ , кг/м<sup>3</sup>)

Дані дослідження показали залежність хвильового поля від стратиграфічних особливостей моделі реального розрізу, складеного на основі експериментальних даних, із врахуванням температурних ефектів розподілу температури для моделі верхніх (осадових) шарів Землі, отриманих, зокрема, з використанням даних монографії [7]. Останнє дозволяє вважати, що температурні ефекти, які можуть бути змінені під впливом додаткових (штучних) температурних джерел можуть враховуватись при використанні даної методики.

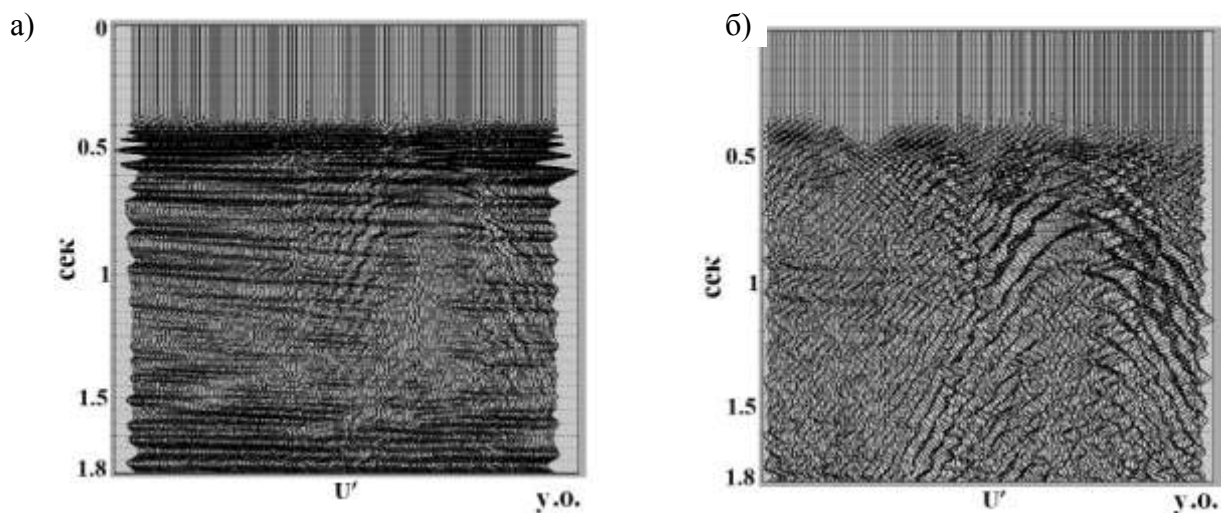


Рис.2. Поле швидкості переміщення, теоретична сейсмограма – залежність а) вертикальної і б) горизонтальної компонент швидкості переміщення від часу (в секундах), в умовних одиницях (у.о.), розрахована на денній поверхні вздовж профілю для сейсмічного розрізу земної кори під Чорнобильською АЕС на рисунку 1.

На рисунку 2. та рисунку 3. представлено теоретичні сейсмограми залежностей вертикальної та горизонтальної компонент швидкості переміщення та прискорення від часу для сейсмічного розрізу земної кори під Чорнобильською атомною електростанцією. На сейсмо-

грамі поля швидкості переміщення (набір трас – велосиграми на рисунку 2) відмічаємо відбиття від границь шарів моделі на рисунку 1 та ефект впливу розлому у вигляді купола підвищеної амплітуди відбиттів від розлому у правій частині рисунка, які мають суттєве зростання саме на поперечних коливаннях. Очевидно, що температурні ефекти спричинені присутнім тут розломом можуть призводити до ефективних струшувань, зокрема, на частотах приблизно 10, 15, 25 Гц, які відповідають геометричним розмірам споруди, що дорівнюють приблизно добутку швидкості поширення поздовжніх і особливо поперечних хвиль на періоди коливань. Даний ефект зростатиме із зростанням температури.

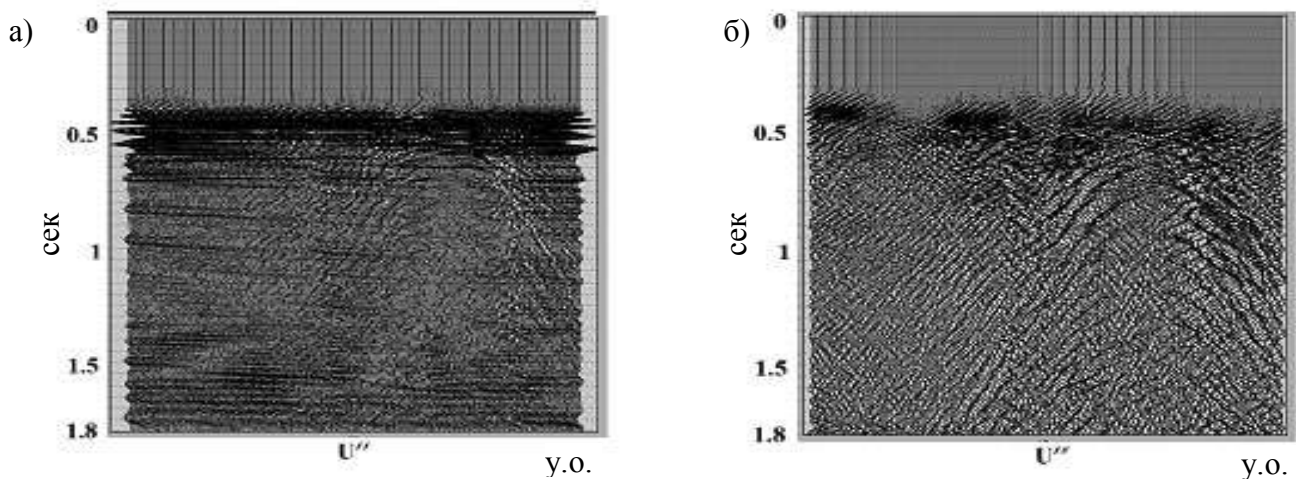


Рис.3. Поле прискорення переміщення, акселерограма – залежність, а) вертикальної і б) горизонтальної компонент прискорення від часу (в секундах), в умовних одиницях (у.о.), розраховані на денній поверхні вздовж профілю для сейсмічного розрізу земної кори під Чорнобильською АЕС

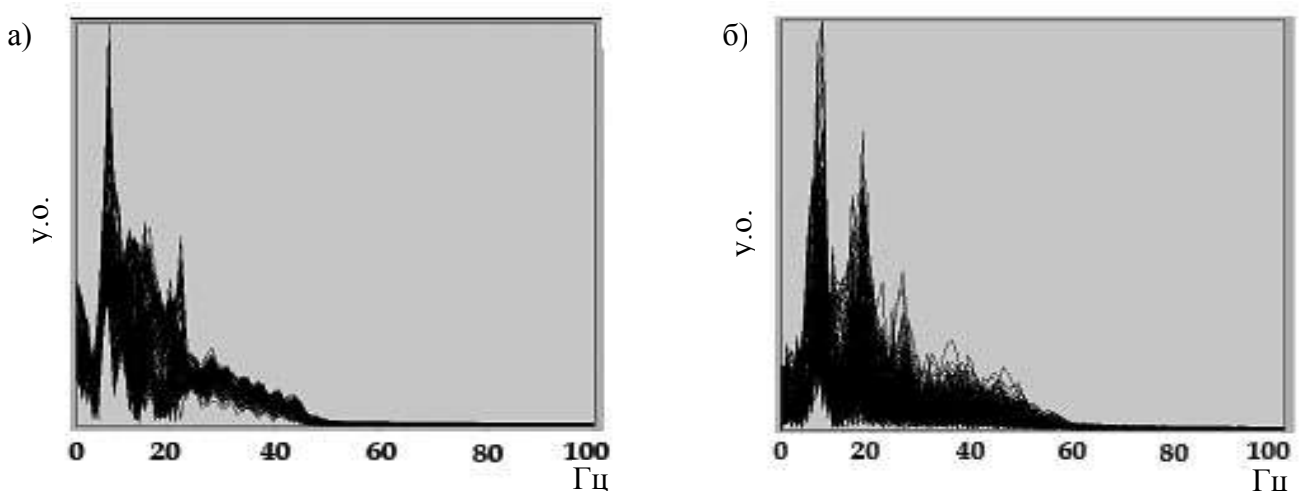


Рис. 4. Спектри передаточних функцій, в умовних одиницях (у.о.), у залежності від частоти в герцах (Гц), а) вертикальної та б) горизонтальної компонент швидкості переміщення для моделі сейсмічного розрізу земної кори під ЧАЕС

Велосиграма (швидкість переміщення) вертикальної компоненти на рисунку 2-а відображає вертикальну структуру, що простежується за часом надходження коливань. Розлом земної кори (рис. 1) розсіює поле в районі 700 м (рис. 2). Кратні хвилі відповідають ревербераціям коливань у шаруватій структурі. Інтерференційні поля кратних хвиль і поле, розсіяне на розломі, зустрічаються в околі 500 м. З погляду інтерпретації хвильового поля велосиграми вертикальних компонент коливань є важливими в тому розумінні, що поперечні

коливання в околі розлому мають відносно більші амплітуди. Останнє дає змогу впевненіше інтерпретувати розломну частину розрізу. На поперечних коливаннях також дещо чіткіше виділяються зустрічні фронти хвиль, які мають місце в шаруватій структурі і розломній частині розрізу.

Спектри вертикальної і горизонтальної компонент швидкості переміщення і прискорення переміщення проілюстровано на рисунку 4. та рисунку 5.

На рисунку 6 представлені фази вертикальної і горизонтальної компонент швидкості переміщення і прискорення переміщення. Одержані результати ілюструють спектральні області істотного впливу сейсмічного перетину на вібрації під об'єктом у широкому частотному діапазоні 0–50 Гц.

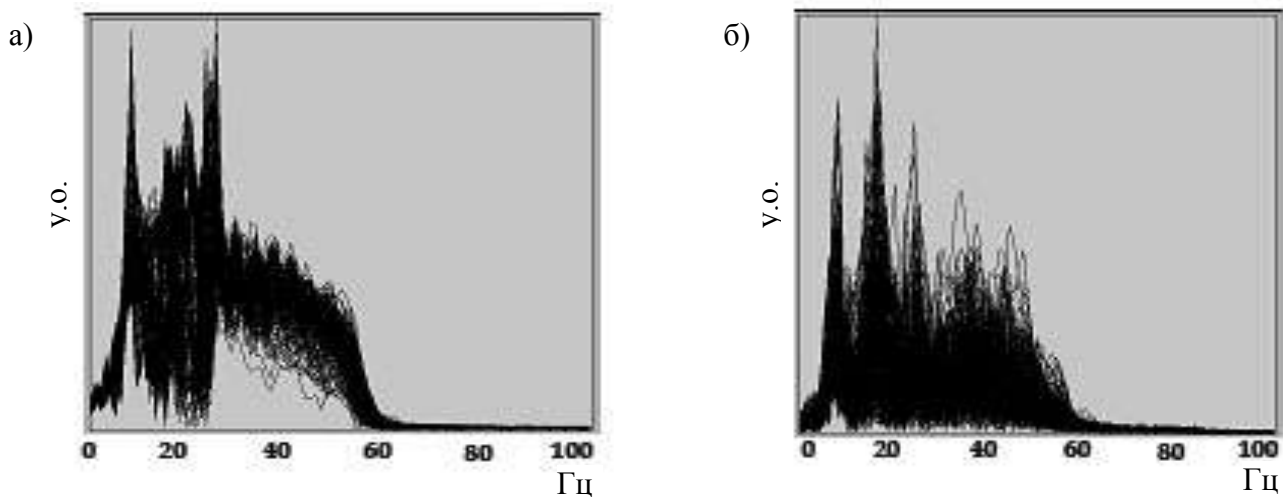


Рис. 5. Спектри передаточних функцій, в умовних одиницях (у.о.), в залежності від частоти в герцах (Гц), а) вертикальної та б) горизонтальної компонент прискорення для моделі сейсмічного розрізу земної кори під ЧАЕС

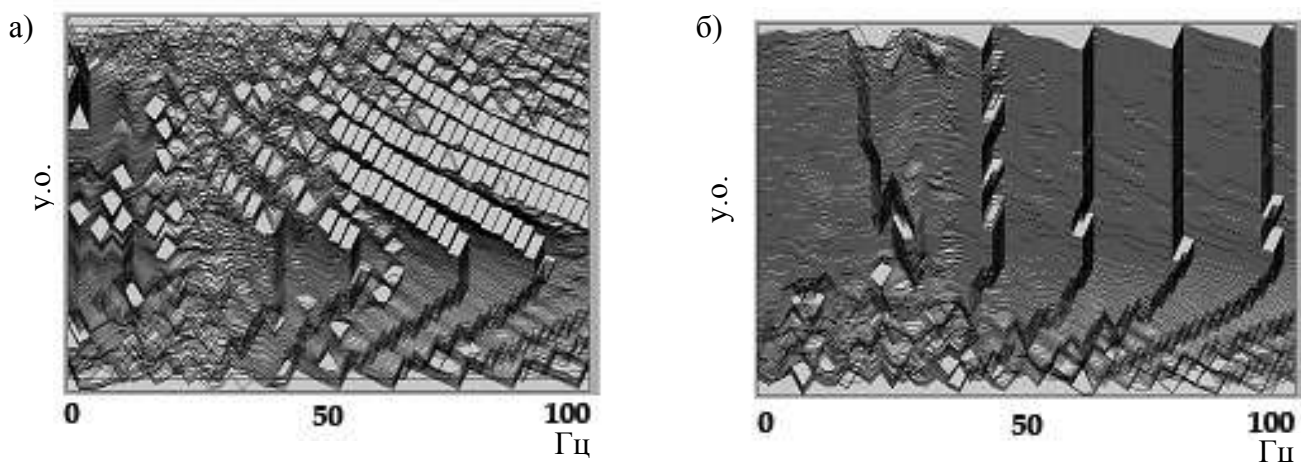


Рис. 6. Фазові спектри передаточних функцій, в умовних одиницях (у.о.), в залежності від частоти в герцах (Гц), а) вертикальної та б) горизонтальної компонент прискорення для моделі сейсмічного розрізу земної кори під ЧАЕС

Наступним кроком інтерпретації хвильового поля представлено акселерограми вертикальної та горизонтальної компонент переміщення (рис. 3). На акселерограмі вертикальної компоненти трасується шарувата структура та область розлому. Поперечні коливання на рис. 3-б, як і у випадку горизонтальних компонент швидкості переміщення (рис. 2-б), більш виразно показують область розлому досліджуваної структури.

Спектри передаточних функцій велосиграм і акселерограм, показані на рисунках 4,5 мають ряд характерних максимумів спектрів. Причому спектри передаточних функцій швидкості переміщення у випадку вертикальних і горизонтальних компонент відрізняються більш вираженою шириною спектру біля 100 Гц для горизонтальних компонент. Через, що високо-частотні коливання на горизонтальних спектрах виражені краще. Що стосується акселерограм, у випадку горизонтальної компоненти спектр – більш широкий. Однак, тут спостерігаємо широкий спектр і для вертикальної компоненти.

Фазові спектри акселерограм на рисунку 6 показують більш рівний характер для вертикальної компоненти і часті переходи через 0 для горизонтальної компоненти прискорення, що відповідає більшому насиченню коливаннями (в нашому випадку поперечними хвилями) передаточних функцій акселерограм. Слід зауважити, що фазові спектри залишаються інформативними в області частот, вищих за 60 Гц, де амплітудні спектри мають на графіках нульові значення (рис. 4,5). Фазові спектри передаточних функцій швидкості переміщення (тут не подані) – мають аналогічний характер.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного модельного дослідження робимо висновок, що запропоноване розв'язання задачі про вивчення сейсмічного стану інженерних об'єктів з врахуванням термічних ефектів дає можливість змодельовати вертикальну і горизонтальну компоненти хвильового поля у випадку складно-побудованих розрізів з вертикальною і горизонтальною неоднорідністю геолого-геофізичних параметрів, з врахуванням нахилу границь, розломів, неоднорідностей, з можливістю аналізу хвильового поля та інтерпретації поздовжніх, поперечних хвиль та впливів природної незначної зміни температури в районі об'єкту.

Метод дозволяє враховувати зосереджені джерела підвищеної температури на інженерному об'єкті.

Представлено приклад застосування методу скінчених елементів для дослідження характеру хвильового поля в земній корі для неідеально-пружного середовища під інженерними об'єктами, на прикладі Чорнобильської АЕС для випадку, коли неідеально-пружність враховується шляхом оцінки впливу температурних змін на сейсмічний стан об'єкту.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К.Бате, Е. Вилсон . – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
2. O.C. Zienkiewicz., R.L.Taylor. The finite element method. Fifth edition. V. 1-3. Oxford 2000. – 689 p., 459 p., 334 p.
3. Bathe K.-J. Finite element procedures in engineering analysis. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1982. – 738 p.
4. Стародуб Ю. П. Математичне моделювання динамічних задач сейсміки для вивчення будови земної кори. Пряма задача / Ю. П. Стародуб. – Т.1. - Львів: Наукова бібліотека ім.В.Стефаника НАН України, 1996. - 172 с.
5. Starodub Yu.P., Brych T.B. Modeling of Wave Fields Using the Fore-Carpathian Oil Fields as an Example Geophys. J.International. – 1998. – P. 329-342.
6. Моделювання хвильового поля в сейсмічних розрізах Карпатського орогену з метою поглиблення вивчення нафтогазоносних структур / Стародуб Ю., Шеремета П., Кендзера О., Брич Т., Середжук С., Стародуб Г. // Нафта і газ України – 2004: Матеріали 8-ої Міжнар. наук.-практ. конф., 29 вересня – 1 жовтня 2004 року. – Судак, Том 1. – С. 359 – 361.
7. Кутас Р. И. Поле тепловых потоков и теоретическая модель земной коры / Р. И. Кутас. – Киев: Наук. думка, 1998. – 147 с.

**Ю.П. Стародуб**<sup>1)</sup> д.физ.-мат.н., профессор, **О.В. Кендзера**<sup>2)</sup> к.физ.-мат.н., ст.н.с.,  
**Т.Б. Брыч**<sup>2)</sup> к.т.н., **Б.Е. Купльовский**<sup>2)</sup> к.физ.-мат.н.

<sup>1)</sup> *Дочернее предприятие «Науканафтогаз» Национальная акционерная компания «Нафтогаз» Украины;*

<sup>2)</sup> *Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, г.Киев)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*Представлен подход метода конечных элементов для моделирования волнового поля в сейсмо-геологическом разрезе с учетом температурного воздействия на колебания в области исследуемого объекта. Проведено математическое моделирование сейсмического волнового поля в сечении земной коры в окрестности строительной структуры с целью изучения влияния колебаний и их спектральных характеристик на инженерное сооружение. В качестве примера взято модельное сечение земной коры под Чернобыльской атомной электростанцией.*

*Ключевые слова: математическое моделирование, сейсмическое волновое поле, атомная электростанция.*

**G.P.Starodub**<sup>1)</sup> *doctor physical-math sci., professor, A.V. Кендзера<sup>2)</sup> *Ph.D., senior sci.res.,*  
**T.B. Brych**<sup>2)</sup> *Ph.D., B.E. Kuplyovsky<sup>2)</sup> *Ph.D.***

<sup>1)</sup> *"Naukanaftogaz" national joint stock company "Naftogaz", Ukraine;*

<sup>2)</sup> *S.I.Subbotina Institute of geophysic., NAS of Ukraine, Kyiv)*

## **STUDY OF THE SEISMIC STATE ENGINEERING FACILITIES, TAKING INTO ACCOUNT THERMIC EFFECTS ON THE EXAMPLE OF CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT**

*Finite element method approach for the simulation of wave field in seismic geological cut, taking into account the thermal effects on vibrations in the field of investigated object presented. Mathematical modeling of the seismic wave field in section of the crust near the structure construction to study vibrations and their spectral characteristics on engineering construction is conducted. As an example, modeling section of the Earth's crust underneath the Chernobyl nuclear power plant taken.*

*Keywords: mathematical modelling, seismic wave field, nuclear power plant.*

Відділ сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна  
НАН України. 79011, м.Львів, вул. Ярославенка, 27. +38(032)270-61-00; 270-83-46