НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В. КАРПЕНКА

На правах рукопису

БРИЧ
Тарас Богданович

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ СЕЙСМІЧНИХ ХВИЛЬ В НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ НА ОСНОВІ МАТРИЧНО-СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНОГО МЕТОДУ

Спеціальність 05.13.02 – Математичне моделювання в наукових дослідженнях

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ - 1996 р.

АВ 34.624

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Карпатському відділенні Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України.

Науковий керівник - канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. сп.
Стародуб Юрій Петрович

Офіційні опоненти - док. техн. наук,
проф. Стахів Петро Григорович

док. фіз.-мат. наук,
проф. Отірко Ігор Васильович

Провідна установа - Інститут прикладних проблем механіки та математики НАН України, м.Львів

Захист відбудеться "4" червня 1996 р. о 16[00] год. на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 04.01.02 при Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України за адресою: 290601, Львів-53, МСП, вул. Наукова, 5.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту (290601, Львів-53, МСП, вул. Наукова, 5).

Автореферат розісланий "27" квітня 1996 р.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
канд. техн. наук Бунь Р.А.

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00760224 (L)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. В даний час перед геофізикою України стоять життєво важливі проблеми по дослідженню кори і верхньої мантії Землі, метою яких є прогнозування залежів вуглеводнів, визначення та дослідження фізико-механічних полів (деформацій, напружень) у земних породах для надійного будівництва як виробничих, так і житлових об'єктів, а також для гірничої справи. Розв'язання названих проблем неможливе без застосування сейсмічних методів досліджень і використання ЕОМ для обробки одержаних експериментальних даних, числового аналізу складних геофізичних процесів. Відомі методи моделювання хвильових полів розроблені для порівняно простих моделей середовищ. Земля має значно складнішу будову. Тому, дослідження, спрямовані на розробку методики побудови математичних моделей, моделювання сейсмічних хвиль, які поширюються в складнопобудованих середовищах (горизонтально-шаруватих, з неоднорідностями різних форм), і вивчення впливу на параметри хвильових полів фізичних і геометричних властивостей шарів, включень, розломів, виклинювань, пустот, нафто-газових пасток, є цікавими як з теоретичного, так і з практичного боку.

На даний час розроблена велика теоретична база і об'ємне програмне забезпечення для досліджень земної кори матричним методом теорії поширення хвиль в шаруватих середовищах. Цій проблемі присвячені наукові праці Томсона (Thomson W.T.), Хаскела (Haskell N.A.), Молоткова Л.А., Ратнікової Л.І., Львовщина А.Л., Данкіна (Dunkin J.W.), Кеннета (Kennet B.L.N.), Бучина Б.Г., Бабича В.М., Вербицького Т.З., Стародуба Ю.П., Починайка Р.С.. Крім того, багато вчених-геофізиків, таких як Латиніна Л.А., Фадєєв А.Б., Такемото (Takemoto S.), Гаррісон (Harrison T.), Норрі Д., де Фріз Ж., Сегерлінд Л. і інші підтвердили можливість використо-

вувати розроблену в роботах Дж. Одена, Р. Галлагера, К. Бате, Р. Вілсона, О. Зенкевича, К. Моргана, І. Чанга та інших теорію методу скінчених елементів (МСЕ) для моделювання і дослідження фізико-механічних полів та хвильових процесів у складних середовищах типу кори Землі. При цьому матричний метод не може використовуватися для моделювання середовищ, структура яких є не шаруватою або якщо існує перетин шарів. МСЕ, у свою чергу, потребує великої потужності обчислювальних машин і тривалого часу розрахунків при великих просторовочасових тривалостях, що маємо при моделюванні геофізичних об'єктів.

Тому є актуальною тема, присвячена розробці методики і реалізації її у вигляді пакету прикладних програм, що дозволяють використовувати МСЕ у комплексі з матричним методом до моделювання складних середовищ, близьких до реальної структури земної кори, досліджувати хвильові процеси і вплив на них різних геологічних структур шляхом порівняння теоретичних сейсмограм з експериментальними.

Актуальність розробок підтверджується тим, що вони були використані при виконанні конкурсних тем Державного комітету України з питань науки і технологій 05.41.02/013-92 "Вивчення внутрішньої будови земної кори в сейсмонебезпечних районах Карпатського регіону на основі врахування горизонтальної неоднорідності середовища" програми 04.02 "Ресурсозберігаючі технології хімічної та біологічної промисловості" та теми 05.53.01/139-93 "Уточнення будови сейсмогеологічного розрізу для вирішення задачі прямих пошуків родовищ вуглеводнів на великих глибинах" програми 04.13.00 "Ресурси енергетичної сировини, рудних і нерудних корисних копалин".

Мета та задачі дослідження. Метою дисертації є розробка підходів до математичного моделювання напружено-деформованого стану і хвильових полів для проведення досліджень в області геомеханіки, сейсмології і сейсморозвідки шляхом використання комплексу методів скінченних елементів і матричного динамічної теорії поширення сейсмічних хвиль; реалізація отриманої методики у виді пакету програм і проведення модельних досліджень для реальних об'єктів: включення, штольні, шахти, проходження сейсмічних хвиль через геологічні структури Східних Карпат.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі:

- провести дослідження алгоритмів методу скінчених елементів для моделювання часових залежностей переміщень, їх швидкостей та прискорень в залежності від параметрів рекурентних співвідношень МСЕ стосовно прямих динамічних задач сейсмології і сейсморозвідки;

- розробити методику об'єднання матричного методу динамічної теорії поширення хвиль з методом скінчених елементів для дослідження поширення сейсмічних хвиль в складних неоднорідних середовищах, що містять одночасно шаруваті структури і блоки різноманітних включень;

- розробити комплекс програм для розрахунку полів деформацій та напружень в довільній точці середовища, а також часових залежностей переміщень, їх швидкостей та прискорень у вказаних точках середовищ;

- побудувати фізико-математичні моделі кори сейсмонебезпечних районів Східних Карпат та нафтогазового родовища Лопушнянське і провести вивчення напружено-деформованого стану та поширення сейсмічних хвиль в цих моделях.

Достовірність основних наукових положень та одержаних результатів забезпечується коректністю постановки розглянутих задач, строгістю математичних перетворень і викладок при побудові

ровв'язків та рекурентних формул, математичною перевіркою стійкості одержаних методик, а також перевіркою дієздатності програм при порівнянні одержаних результатів для простих моделей з аналітичними ровв'язками і результатами, які можна отримати іншими числовими методами, що вже пройшли перевірку на практиці.

Методи досліджень. Основу методології досліджень складають розроблені в дисертації підходи моделювання методом скінчених елементів та комплексом двох методів, а саме, МСЕ та матричним методом. Також широко використовуються методи обчислювальної математики та програмування.

Наукова новизна. Розроблено методику моделювання сейсмічних хвиль на основі комбінації двох методів - МСЕ та матричного, яка дозволяє моделювати поширення хвиль через складнопобудовані середовища, що містять шаруваті структури і блоки з неоднорідностями, включеннями, розломами. Запрограмовано значення параметрів рекурентних співвідношень МСЕ, які забезпечують моделювання поширення сейсмічних хвиль в складних середовищах.

На захист виносяться такі основні положення:

- розроблена нова методика визначень полів деформацій і напружень для різних складних геометрично і фізично неоднорідних середовищ під дією зовнішніх переміщень і напружень, можливість досліджувати вплив на загальну картину окремих геологічних об'єктів на основі МСЕ;

- розроблена нова методика дослідження поширення сейсмічних хвиль в складних неоднорідних середовищах під дією як одного, так і багатьох збудників, моделювання різних за своєю фізичною і геометричною будовою джерел на основі комплексу МСЕ з матричним методом;

- створені оптимальні по швидкодії і використанню оперативної пам'яті алгоритми і програми для ПЕОМ, що реалізують вказані

вище методики;

- проведені дослідження з використанням розроблених методик і програм - аналіз розподілу переміщень, деформацій і напружень у земній корі навколо неоднорідностей і пустот у гірських районах Східних Карпат, вплив локальних неоднорідностей і їх параметрів на хвильове поле на вільній поверхні у випадку поширення сейсмічних хвиль через середовище, максимально наближене до будови земної кори в районі Східних Карпат, а також моделювання хвильових полів на нафтогазових родовищах.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання розроблених методик, програмного забезпечення та одержаних результатів науково-дослідними, проектно-конструкторськими організаціями та виробничими об'єднаннями при будівництві житлових і виробничих об'єктів, в тому числі для розбудови і укріплення шахт, штолень, а також при моделюванні і аналізі хвильових полів для вирішення задач сейсмології і сейсморозвідки, зокрема, для прогнозування покладів вуглеводнів.

Реалізація результатів роботи. На основі розробленої методики розрахунку напружено-деформованого стану і розрахунку сейсмограм було створено програмний комплекс, який пройшов перевірку на сейсмогеологічних розрізах Східних Карпат, нафтовому родовищі Лопушнянське Карпатського регіону, штольні "Мужієво" Берегівського району Закарпатської області. Методика була випробувана на Покачовському і Родніковому родовищах Західного Сибіру.

Апробації роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на 12-ій конференції молодих вчених ІППММ АН УРСР у Львові 21-23.10.1987 р., на IV Міжнародному Симпозіумі з аналізу сейсмічності і сейсмічного ризику в Празі (вересень 1989 р.) та на XXIV Генеральній Асамблеї Європейської Сейсмологічної комісії в Афінах 19-24 вересня 1994 р.

В цілому робота обговорювалась на науковому семінарі Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, на науковому семінарі кафедри прикладної математики Української Академії Друкарства, на наукових семінарах ряду відділів Інституту прикладних проблем механіки та математики ім. Я.С. Підстригача НАН України.

Публікації. Результати виконаних досліджень опубліковані у 9 роботах.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, підсумків і списку літератури з 107 найменувань. Робота містить 117 сторінок основного тексту, в тому числі 53 рисунки.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено літературний огляд робіт по матричному методу динамічної теорії поширення хвильових полів в шаруватих середовищах та по використанню методу скінчених елементів до вирішення динамічних задач теорії пружності в геофізичних прикладеннях. Зроблено стислий аналіз сучасного стану проблеми. На основі зробленого огляду обгрунтовано актуальність вибраної теми і сформульовано основні завдання досліджень.

У першому розділі описано загальну математичну модель, яка розглядається, відповідно до поставленого завдання застосування числових методів і їх комплексного використання при проведенні досліджень в області геофізики. Коротко її можна сформулювати наступним чином.

Розглядається твердий півпростір, який складається з пачки ізотропних, однорідних, горизонтальних шарів, що мають прямолінійні границі. N-тий шар має нескінчену товщину, m-тий шар характеризується товщиною - d_m, густиною - ρ_m, швидкістю поширення повздовж-

них і поперечних хвиль - відповідно V_{Pm}, V_{Sm}, m=1,...,N. На кожній границі задається рівність переміщень і напружень. На безмежності, на поверхні або на границі одного із шарів може діяти "джерело". Один із шарів має складну будову (це може бути включення, провал або виклинювання). На вільній границі знаходиться приймач, тобто в цій точці нас цікавить результат проходження хвилі через середовище: переміщення, швидкість переміщення.

Розглянуто основні співвідношення матричного методу динамічної теорії поширення хвильових полів у формулюванні Томсона-Хаскела та його модифікації і основи методу скінчених елементів.

На основі типового підходу до інтегрування рівнянь руху МСЕ і розробленої оцінки стійкості обчислювальної схеми виписано дві наступні рекурентні формули для часових розв'язків поставлених задач:

а) $$\left(M+\frac{\Theta\Delta t}{3}C+\frac{\Theta^2\Delta t^2}{12}K\right)U^{n+1}=\left(M+\frac{\Theta\Delta t}{3}C-\frac{\Delta t^2}{12}(6-\Theta^2)K\right)U^n+$$

$$\left(M+\frac{(2\Theta-3)\Delta t}{6}C+\frac{\Theta(\Theta-2)\Delta t^2}{12}K\right)S^n+\frac{\Delta t^2}{6}\left((3-\Theta)P^n+\Theta P^{n+1}\right), \qquad (1)$$

$$S^{n+1}=-S^n+2\Delta U^{n+1}; \qquad (2)$$

б) $$\left(\frac{\Theta^2}{2}M+\frac{\Theta^2\Delta t}{12}(2\Theta-3)C+\frac{\Theta^3\Delta t^2}{24}(\Theta-2)K\right)U^{n+1}=$$

$$\left(\Theta^2M+\frac{\Theta^2\Delta t}{3}(\Theta-3)C+\frac{\Theta^3\Delta t^2}{12}(\Theta-4)K\right)U^n+$$

$$\left(-\frac{\Theta^2}{2}M+\frac{\Theta^2\Delta t}{12}(9-2\Theta)C+\frac{\Theta^2\Delta t^2}{24}(6\Theta-\Theta^2-12)K\right)U^{n-1}+$$

$$\frac{\Theta^2\Delta t^2}{24}\left(\Theta(\Theta-2)P^{n+1}+2\Theta(4-\Theta)P^n+(12-6\Theta+\Theta^2)P^{n-1}\right), \qquad (3)$$

де **M, C, K** - відповідно матриці мас, загасання та жорсткості системи; Δt - крок по часу; Θ - параметр інтегрування рівнянь руху при

виводі рекурентних схем, який має вплив на стійкість останніх; U^i, P^i - глобальні вектори переміщень і зовнішніх збудників на i-тому кроці розрахунку; а також введено позначення: $\Delta U^i=U^i-U^{i-1}$; $S^i=U^i\Delta t$.

Схема а) використовується для "запуску" процесу розрахунку на першому кроці, далі весь розрахунок ведеться на базі схеми б).

У другому розділі проведено дослідження стійкості одержаних рекурентних формул (1)-(2) і (3) методу скінчених елементів. Наведено сукупності залежностей $\rho(\Theta)$ і $\rho(\alpha)$, де $\alpha^2=\omega^2\Delta t^2$, ω - кутова частота коливань системи, ρ - радіус збіжності рекурентних схем, що характеризують залежність одержаного розв'язку від параметру інтегрування рівнянь руху - Θ. Підібрано оптимальні параметри в рекурентних схемах для застосування одержаних схем до задач геофізики: деформографічних спостережень, сейсмології і сейсморозвідки. Дослідження залежності радіуса збіжності $\rho(\Theta)$ рекурентних схем а) і б) показали, що для схеми а) при значенні параметра $\Theta\geq1.98$ радіус збіжності буде меншим від одиниці, що свідчить: при таких значеннях Θ дана схема є стійкою. А мінімальної асимптотики для схеми а) $\rho=0.58$ досягає при $\Theta=3$. Внаслідок аналізу залежностей $\rho(\Theta)$ при $\alpha^2=\omega^2\Delta t^2\to\infty$ і $\rho(\alpha)$ зроблено висновок, що схема б) буде стійкою при значеннях параметру інтегрування $\Theta>3$. Провівши обчислення на модельних прикладах було вибрано оптимальний параметр інтегрування - значення $\Theta=4.7$, при цьому значенні Θ значення $\rho(\alpha)$ для схеми б) є найменшим і прямує до 0.68. Розглянуто питання вибору кроку по часу в залежності від власних частот самої моделі і від зовнішнього сигналу, змінного в часі. Проведено моделювання і порівняння розв'язків для шаруватого середовища, одержаних методом скінчених елементів і матричним методом. Цей числовий експеримент підтвердив придатність розроблених алгоритмів для розглянутих геофізичних задач. При моделюванні поширення хвиль через шаруваті середовища

часи приходу відбитих хвиль збігалися з розрахованими матричним методом, окрім того МСЕ забезпечив можливість моделювання хвильових процесів при моделюванні середовищ із горизонтальними неоднорідностями.

Використано формулювання матричного методу для рівняння стану типу Кельвіна-Фойгхта у випадку шаруватих середовищ (Гуревич Г.І. 1974):

$$\sigma_{\theta r}(t) = \mu^* \varepsilon_{\theta r}(t,\tau) + (\mu + \mu^*) \frac{\partial \varepsilon_{\theta r}(t,\tau)}{\partial t}, \qquad (4)$$

де μ - модуль всуву Гука, μ^* - пружно-релаксаційний модуль; $\sigma_{\theta r}(t)$ - компонента тензора напружень, а $\varepsilon_{\theta r}(t,\tau)$ - всувна деформація, залежна від часу релаксації τ.

Отримано формули розрахунку у кожній точці n-го шару Фур'є-образів компонент вектора переміщень і напружень $\tilde{\mathbf{S}}_n(z) \equiv \left(\tilde{u}_r^{(n)}(z),\ \tilde{u}_z^{(n)}(z),\ \tilde{\sigma}_{zz}^{(n)}(z),\ \tilde{\sigma}_{rz}^{(n)}(z)\right)^T$ для відповідних хвильових потенціалів $\tilde{\Phi}_n(z) \equiv \left(\tilde{\varphi}_n^+(z),\ \tilde{\psi}_n^+(z),\ \tilde{\varphi}_n^-(z),\ \tilde{\psi}_n^+(z)\right)^T$:

$$\tilde{\mathbf{S}}_n(z) = \mathbf{T}_n \tilde{\Phi}_n(z), \qquad (5)$$

$$\tilde{\Phi}_n(z) = \mathbf{T}_n^{-1} \tilde{\mathbf{S}}_n(z). \qquad (6)$$

Матриця $\mathbf{T}_n$ зв'язку компонентів векторів переміщень-напружень і хвильових потенціалів розвинутого підходу (аналогічно Dunkin J.W. 1965) має вигляд:

$$\mathbf{T}_n = \begin{bmatrix} -ik & -k_{s_n} & -ik & k_{s_n} \\ k_{p_n} & -ik & -k_{p_n} & -ik \\ \mu_n l_n & -2ik\mu_n k_{s_n} & \mu_n l_n & 2ik\mu_n k_{s_n} \\ -2ik\mu_n k_{p_n} & -\mu_n l_n & 2ik\mu_n k_{p_n} & -\mu_n l_n \end{bmatrix}, \qquad (7)$$

де введено позначення

$$l_n = 2k^2 - \omega^2 / V_{s_n}^2, \qquad \mu_n = \rho_n V_{s_n}^2,$$

$$k_{P_n} = i\sqrt{\left(\frac{\omega}{V_{P_n}}\right)^2 - k^2}, \qquad k_{P_n} = i\sqrt{\left(\frac{\omega}{V_{P_n}}\right)^2 - k^2},$$

причому k і ω є параметрами перетворення Фур'є, внаслідок якого відбувається перехід від просторово-часових змінних до частотно-хвильового простору. Значення хвильових потенціалів на (n+1)-й границі виражається через їх значення на n-й границі формулою

$$\tilde{\Phi}_n(z_n) = E_n \tilde{\Phi}_n(z_{n-1}), \tag{8}$$

де

$$E_n(d_n) = \mathrm{diag}\left[\exp\left(k_{P_n} d_n\right),\ \exp\left(k_{S_n} d_n\right),\ \exp\left(-k_{P_n} d_n\right),\ \exp\left(-k_{S_n} d_n\right)\right], \tag{9}$$

diag - позначення для діагональної матриці, $d_n = z_n - z_{n-1}$ - товщина n-го шару, а z_n і z_{n-1} - координати відповідно n-ї та (n-1)-ої границь.

На поверхні шаруватого простору задається вектор $\tilde{S}_0$, причому дві компоненти вектора $\tilde{S}_0$ - напруження - вважаються заданими, а дві інші - переміщення - необхідно визначити. Граничні умови в даному випадку в Фур'є-просторі будуть виглядати так:

$$\tilde{S}_1(z_0) = S_0. \tag{10}$$

Неперервність переміщень і напружень на границях між шарами описується умовою

$$\tilde{S}_n(z_n) = \tilde{S}_{n+1}(z_n), \quad \forall\, n = 1, N-1 \tag{11}$$

і, враховуючи те, що в нижнього півпростору хвилі не приходять, оскільки для вибраної моделі півпростір в напрямку осі z необмежений, записується умова

$$\tilde{\varphi}_n^+ = \tilde{\psi}_n^+ \equiv 0. \tag{12}$$

З врахуванням умов рівності напружень і переміщень на границях шарів, в формул (5) та (6), зважаючи матриці T_n і оберненої їй матимемо

$$\tilde{\Phi}_n(z_{n-1}) = Q(z_{n-1}, z_n)\, \tilde{\Phi}_n(z_n). \tag{13}$$

де

$$Q(z_{n-1}, z_n) = E_n^{-1} T_n^{-1} T_{n+1}. \qquad (14)$$

Розроблено методику моделювання хвильових полів у складних середовищах комплексом методів матричного і скінченоелементного. Сейсмічні розріви, на яких моделюються хвильові поля при докладному вивченні будови земної кори, дослідженні родовищ вуглеводнів на великих глибинах, характеризуються горизонтальною неоднорідністю шарів, розломами, виклиненнями, включеннями і, головне, впливом великої, порівняно з неглибокими родовищами, товщі порід у напрямку до денної поверхні. У такому випадку вигідно розділити розріз по глибині на частину, яку усереднено можна вважати шарувато-однорідною і моделювати її матричним методом, і суттєво неоднорідну, до якої слід застосувати обчислювальний метод, який найбільш вручно моделює геометричні неоднорідності середовища. Таким є МСЕ. За допомогою МСЕ, порівняно з матричним методом, трудно проаналізувати сейсмічне хвильове поле, яке має складний характер. Через те методи матричний і скінчених елементів об'єднані з метою моделювання об'єктів земної кори, які характеризуються значними геометричними протяжностями і складною будовою.

Проходження хвилі через пачку шарів моделюється матричним методом динамічної теорії поширення хвиль поступово ускладнюючи модель (збільшуючи кількість шарів, враховуючи нахил границі шарів). Однак проходження хвиль через ділянку середовища, яка має складку структуру (горизонтальні неоднорідності, розломи), матричним методом змоделювати ми не можемо, тому в цьому випадку використовується метод скінчених елементів, який при моделюванні скінчених об'єктів із складною структурою має переваги перед матричним.

Фізико-математична постановка задачі в цьому випадку матиме вид: визначити вектор переміщення-напруження

$$B(r,t) = (u_x(r,t), u_z(r,t), \sigma_{xx}(r,t), \sigma_{xz}(r,t))^T,$$

де $r = (x, z)$, $r < |r|_{max}$, у півпросторі з горизонтально-неоднорідними шарами, який задовільняє рівняння руху для переміщень

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F, \qquad (15)$$

де **M, C, K** - матриці мас, загасання та жорсткості системи відповідно, які входять в рекурентну формулу (3), **F** - вектор прикладених сил, а **U, $\dot{U}$, $\ddot{U}$** - відповідно вектор переміщень, його перша і друга похідні по часу.

Мають місце умови контакту на границях шарів

$$B_m(z_m) = B_{m+1}(z_m), \quad m = 1, \ldots, N-1; \qquad (16)$$

де N - число шарів, і задовільняється принцип причинності для хвильового поля, що поширюється в півпросторі

$$B_m(z,t) = 0, \quad v^* = \min\left(v_{p_m}, v_{s_m}\right), \quad 1 \le m \le N. \qquad (17)$$
$$v \ge v^*$$

На границі між зонами, де застосовуються різні методи, проводиться "вшивка" двох методів, задаючи умови рівності переміщень і напружень. При цьому застосовується пряме перетворення Фур'є виду:

$$\tilde{f}(k,z,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,z,t)\exp(-i\omega t + ikx)\,dt\,dx, \quad i = \sqrt{-1}, \qquad (18)$$

і зворотне до нього, оскільки матричний метод працює в Фур'є-просторі (k,ω), а методом скінчених елементів результати отримуємо в просторі координат і часу (x,t).

Описано врахування нахилу границь, загасання сейсмічних коливань і виділення на трасах сейсмограм кратних і типів хвиль. Останнє є важливим при "вшиванні" методів, оскільки часто розглядається однократне проходження хвиль через середовище. Описано узгодження двох методів на межі досліджуваних областей.

Якщо джерело коливань $B(r_s, t)$ знаходиться на вільній гра-

ниці, то розглядається задача поширення однократної хвилі через пачку шарів, далі - перехід у складне середовище і моделювання хвильових процесів МСЕ. Одержаний результат розглядається як "джерело", що діє знизу на пачку шарів. Результуюча картина реєструється на вільній границі. Якщо джерело діє в неоднорідному середовищі, то його моделюємо МСЕ, далі результат розглядається, як і в попередньому випадку, з початковими умовами для поширення хвиль через пачку шарів вниз.

У третьому розділі подано результати статичного моделювання методом скінчених елементів переміщень, деформацій і напружень земної кори навколо неоднорідностей і пустот у гірських породах в районі Східних Карпат.

Було вивчено напружено-деформований стан навколо перспективної золотоносної штольні "Мужієво" в районі міста Берегове. Штольня "Мужієво" прокопана в породах липаритових туфів і товщі глин у схилі гори Велика Берегівська на Берегівському плоскогір'ї.

Також було проведене моделювання великого масиву земної кори Закарпаття, де розглянута вище область штольні є частиною моделі. Модель розглядалась як ізотропна у вертикальному напрямку і неоднорідна в двох інших напрямках пружна плита з розломами. З метою усунення впливу рельєфу глибина моделі взята 5 км (повний розмір області - 100 км по напрямку Схід-Захід і 50 км по напрямку Північ-Південь) рис.1. Напружено-деформований стан кори досліджувався під впливом стиску, який був прикладений перпендикулярно до Закарпатського і Субпаннонського розломів кори Закарпаття. Змодельовані розломи в районі міст Мукачева, Берегова, Виноградова. Досліджувана область підвищеної сейсмічної небезпеки Берегове-Мукачеве-Свалява має виміри 30 км зі Сходу на Захід, 50 км з Півночі на Південь. Швидкості поздовжніх і поперечних хвиль і густини взяті усередненими по даних II-го Міжнародного геотраверсу.

Точність одержаних результатів в порівнянні з одержаними на деформографах у штольні "Мужієво" ± 5%.

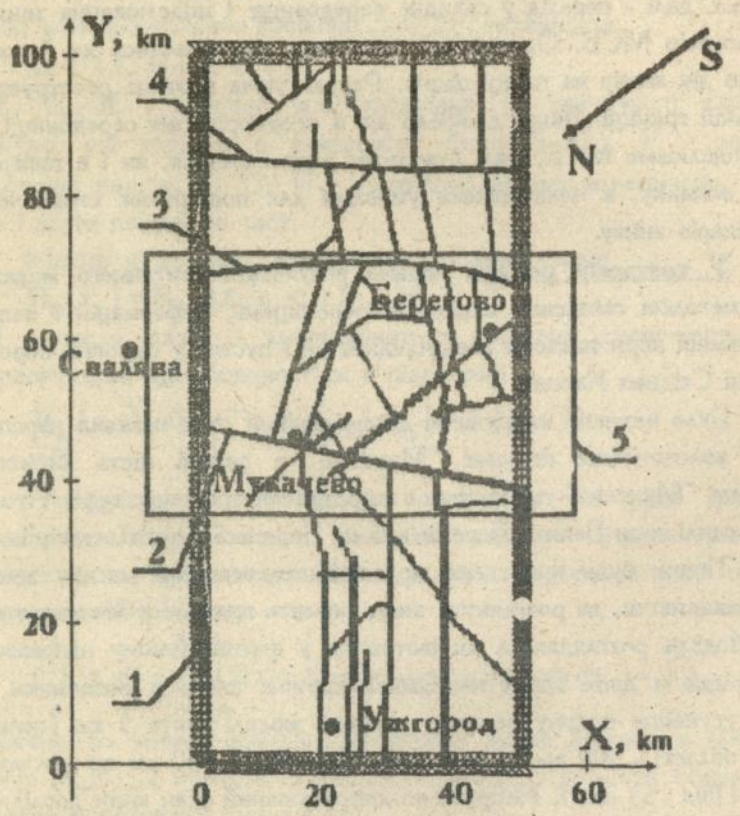

Рис.1. Модель області Берегово-Мукачево-Свалява для методу скінчених елементів. Суцільними лініями показані розломи Земної кори: 1 - Закарпатський, 2 - Мукачівський, 3 - Берегівський, 4 - Виноградівський. 5 - область Берегово-Мукачево-Свалява, в якій проводились дослідження.

Подано результати математичного моделювання методом скінчених елементів поширення хвильових полів через середовище, максимально наближене до будови кори Землі в районі Східних Карпат. Досліджено розсіяння хвиль на розломах. Описані розрахунки дають можливість порівняти результати моделювання з реальними спостереженнями, що проводяться на сейсмостанціях цього регіону. З метою виявлення впливу сейсмічних джерел на хвильове поле, що реєструється на вільній границі півпростору на різних епіцентральних віддалях від джерела, проведене математичне моделювання хвильових полів для II Міжнародного геотраверсу. У модельному розрахунку розглядалося поширення плоскої хвилі під кутом 45^0 до горизонту, яка поширюється з глибини. Підбір форми імпульса теоретичної сейсмограми здійснювався накладанням на зареєстровану сейсмографом. В часі джерело коливань було змодельовано як сила типу імпульсу Берлаге тривалістю 20 с у вигляді двох періодів синусоїди, перша з яких мала амплітуду у три рази меншу від наступної. Розглянуто три різних сигнали, що відповідали землетрусам, зареєстрованим 06.08.89 р. і 03.05.89 р. на станціях Косів, Міжгір'я та Ужгород.

Описані результати числових експериментів по моделюванні хвильових полів методом скінчених елементів, а також комплексом двох методів - матричного і скінченоелементного - на нафтогазовому родовищі Лопушнянське. В першому випадку будується скінченоелементна модель поперечного розрізу досліджуваного середовища протяжністю 5 км і глибиною 5 км. В другому - шаруваті структури, в яких передбачаються поклади нафти, змодельовано матричним методом, а складні, з виклиненнями і великими кутами нахилу блоки моделюємо методом скінчених елементів. Джерело в обох експериментах розташоване на вільній границі. Проведено порівняння одержаних результатів.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

У четвертому розділі наведено опис алгоритмів і програм, призначених для виконання числового розв'язування прямих статичних та динамічних задач сейсмології і проведення дослідження впливу геометричних і фізичних параметрів неоднорідностей на хвильове поле.

У розроблений комплекс входять наступні програми:

а) програма статичного моделювання напружено-деформованого стану в складних середовищах на основі методу скінчених елементів;

б) програма визначення власних частот моделі і оптимальних параметрів для моделювання динамічних процесів МСЕ;

в) програма моделювання поширення сейсмічних хвиль у складному середовищі на основі МСЕ;

г) програма моделювання поширення сейсмічних хвиль у шаруватому середовищі на основі матричного методу;

д) програма моделювання поширення сейсмічних хвиль у складнопобудованому середовищі, що включає і шаруваті структури, і блоки з розломами, неоднорідностями і т.п. на основі комплексу матричного і скінченоелементного методів;

е) програми інтерактивної обробки вхідних даних та візуалізації результатів моделювання на дисплеї або принтері.

Для перевірки дієздатності програм були проведені модельні розрахунки для середовищ, у яких значення розрахованих величин можна було порівняти з результатами показів приладів (деформографів для статичних розрахунків в районі Берегова) та з коливаннями на реальних сейсмограмах, отриманих сейсмостанціями, розташованими на Карпатському геодинамічному полігоні.

Програми реалізовані на алгоритмічних мовах ФОРТРАН-IV і С++ для ПЕОМ типу IBM PC AT 486 DX, що забезпечує можливість широкого використання їх для практичних потреб.

У підсумках сформульовано основні результати роботи і наведено основні висновки.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблено новий підхід до дослідження фізико-механічних полів та їх часових залежностей для різних складних геометрично і фізично неоднорідних середовищ на основі моделювання методом скінчених елементів, який, грунтуючись на проведеному аналізі і підібраних оптимальних параметрах в рекурентних схемах дозволяє моделювати поширення сейсмічних хвиль в середовищах, близьких до реальної структури кори Землі.
2. Розроблено нову методику моделювання і дослідження поширення сейсмічних хвиль в складних неоднорідних середовищах, що містять одночасно шаруваті структури і блоки різноманітних включень і неоднорідностей на основі комплексу матричного методу і методу скінчених елементів. Дана методика забезпечує можливість моделювати різну геометричну форму джерел і різноманітні випромінювання, дає можливість враховувати ефект дії статичних сил і початкових навантажень.
3. Для практичної реалізації вказаних методик на алгоритмічних мовах ФОРТРАН і С++ розроблено комплекс програмних засобів, оптимальних по швидкодії і використанню машинної пам'яті, для розрахунку полів деформацій та напружень в довільній точці середовища, а також часових залежностей переміщень, їх швидкостей та прискорень вказаних точках середовищ. В комплексі закладені можливості інтерактивної роботи та візуального опрацювання вхідних даних та результатів моделювання.
4. За допомогою розроблених програм проведено моделювання напружено-деформованого стану в сейсмонебезпечних районах Східних Карпат, змодельовано поширення сейсмічних хвиль через середовище, максимально наближене до будови кори Землі в районі Східних Карпат. Вивчено хвильове поле на моделі нафтогазового родовища Лопушнянське.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ НА ТЕМУ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Вербицкий Т.З., Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б.. Изучение распределения напряжений, деформаций и перемещений в массиве горных пород с цилиндрической неоднородностью // Геофизический журнал. - 1988. - №6. - С. 36-43.
2. Starodub G., Brych T.. East Carpathian crust structure exploration by the finite element method / Proceedings and Activity Report 1992-1994. XXIV General Assembly European Seismological Commission, Athens, - 1994. - P. 600-609.
3. Стародуб Ю.П., Вербицкий Т.З., Брыч Т.Б. и др. Опробование методики решения прямой динамической задачи сейсморазведки на Покачевском и Родниковом месторождениях Западной Сибири - Препринт №15-88 ИППММ АН УССР. - Львов, 1988. - с.24.
4. Стародуб Ю.П., Брич Т.Б. Дослідження глибинної будови та сейсмоактивних розломів земної кори на основі математичного моделювання - Препринт №2 КВ ІГФ НАН України. - Львів, 1995. - с. 37.
5. Starodub G., Brych T. Seismic wave modelling for the Earth's crust of the Transcarpathian region with the Finite Element method // Abstracts of the Fourth International Symposium on Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Prague 4-9. 09. 1989. - P. 43.
6. Starodub G., Brych T. East Carpathian crust structure exploration by the finite element method // Abstracts of the XXIV General Assembly European Seismological Commission, Athens 19-24. 09. 1994. - P. 37.
7. Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б., Гнып А.Р. Комплексирование МКЭ и матричного метода динамической теории распространения сейсмических волн в задаче уточнения строения среды под сейсмическими станциями // Материалы 12-ой конференции

молодых ученых ИППММ АН УССР. - Львов, 21-23. 10. 1987. - С. 178-180. - (Деп. в ВИНИТИ 08. 08. 1988, №6308-В88).

8. Брыч Т.Б.. Изучение особенностей, обусловленных приливными силами деформированного состояния Земли методом конечных элементов // Материалы 12-ой конференции молодых ученых ИППММ АН УССР. - Львов, 21-23. 10. 1987. - С. 17-21. - (Деп. в ВИНИТИ 08. 08. 1988, №6308-В88).
9. Стародуб Ю.П., Брич Т.Б. Комбінований матрично-скінченоелементний метод для вивчення поширення хвильових полів у неоднорідних середовищах // Матер. наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, наук. прац. і аспірантів Української Академії Друкарства, Львів, 3-6. 01. 1995. - С. 132.

Особистий внесок. Всі результати, що складають основний вміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях, написаних у співавторстві, дисертантові належать: в роботах [1] та [5] - методика моделювання МСЕ напружено-деформованого стану, а в [4] і хвильових полів, моделі кори Землі, та отримані розробленим пакетом програм результати моделювання, в роботі [3] - проведено числове моделювання матричним методом, в роботах [2], [6], [7] та [9] - методика моделювання сейсмічних хвиль комплексом методів матричного і скінчених елементів та результати моделювання, отримані розробленим пакетом програм.

Брыч Т.Б. Моделирование распространения сейсмических волн в неоднородных средах на основе матрично-конечноэлементного метода. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.02. - математическое моделирование в научных исследованиях. Физико-механический институт им. Г.В. Карпенка НАН Украины, Львов, 1996.

Разработаны и исследованы рекуррентные алгоритмы метода конечных элементов, а также комплекса матричного и метода конечных элементов для моделирования статических и динамических физико-механических полей в сложнопостроенных средах применительно к прямым задачам сейсмологии и сейсморазведки. На основании предложенного подхода разработан программный комплекс для моделирования статических полей деформаций и напряжений, а также сейсмических волн в сложных моделях сред, которые включают слоистые блоки и блоки с неоднородностями, включениями и т.п.. Данный комплекс апробирован при моделировании напряженно-деформированного состояния в сейсмически опасных районах Восточных Карпат, при изучении волновых полей на примере модели нефтегазового месторождения.

Brych T.B. Simulation of seismic waves propagation in the inhomogeneous media using matrix-finite element method.
Dissertation for obtaining of the scientific degree of candidate of technical sciences on the speciality 05.13.02 - The mathematical modelling in scientific researches, Physico-mechanical Institute of the National Academy of Sciences, Ukraine, Lviv, 1996.

In this dissertation the algorithms of the finite element method and matrix method for simulation of dynamical physical-mechanical fields in direct seismological and seismics problems have been developed and investigated. Basing on this approach the software for strain and stress fields as well as seismic waves simulation in complicated compound structures has been created. The software has been used in stress and strain fields simulation in seismic regions of the Eastern Carpathians and in investigation of seismic waves fields using a deposit of oil and gas as a model.

Ключові слова:
складнопобудовані середовища, математична модель, комплекс числових методів, кора Землі, сейсмічні хвильові поля.

Брич

Підп. до друку 23.04.96 Формат 60×84/16 Папір ор. №2 Друк офсетний
Умовн.друк.арк. Обл.вид.арк. Зам. № 165 Тираж 100

Віддруковано у виробничо-поліграфічному відділі Лв ЦНТЕІ

Ав 34.624