

МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА СТРУКТУРІ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

У роботі представлені результати моделювання сейсмічного хвильового поля на моделі перетину земної кори (на прикладі Дробишівського газоконденсатного родовища). Розріз земної кори, отриманий геофізичним дослідженням свердловин, представлений у вигляді пластової моделі. При моделюванні хвильового поля сейсмозв'язки враховувалися особливості двовимірного перетину: поздовжні, поперечні і обмінні хвилі отримані на сейсмограмах поздовжніх і поперечних коливань.

Ключові слова: моделювання, хвильове поле, модель структури, розріз земної кори, сейсмозв'язка.

Вступ

Для дослідження покладів родовищ вуглеводнів з геологічної точки зору важливу роль відіграють методи математичного моделювання. Оскільки в порівнянні з експериментальними методиками вони володіють рядом переваг, то такі підходи прийняті на більшості етапів дослідження.

На даний час існує велика кількість методів і методик вирішення прямих динамічних задач сейсміки.

Серед існуючих методів своєю перспективністю виділяється методика вирішення динамічної задачі сейсміки методом скінчених елементів (МСЕ). Підхід МСЕ для моделювання динамічних задач сейсміки має ряд значних переваг над іншими існуючими методами, тому що в його основі лежить енергетичний підхід для дослідження коливань середовища.

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 скінченій 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 в МСЕ вектор переміщень апроксимуємо на кожному скінченному елементі через значення переміщень у вузлах елемента - в матричному записі

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}^{(e)} \mathbf{U}, \quad (1)$$

$\mathbf{N}^{(e)}$ – матриця функцій форми.

Залежність між деформаціями і

переміщеннями [1, 2, 3] для елемента (e) можемо записати

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}^{(e)} \mathbf{U}, \quad (2)$$

де $\mathbf{B}^{(e)}$ – диференціальний оператор.

Закон Гука запишемо

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}^{(e)} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

де $\mathbf{D}^{(e)}$ – матриця пружних характеристик елемента (e).

Ввівши позначення для матриці жорсткості:

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} \mathbf{B}^{(e)T} \mathbf{D}^{(e)} \mathbf{B}^{(e)} dv, \quad (4)$$

і вектора навантаження:

$$\mathbf{f} = \sum_{e=1}^E \mathbf{f}^{(e)}, \quad (5)$$

де $\mathbf{f}^{(e)} = \int_{V^{(e)}} \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{F} dv + \int_{S^{(e)}} \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{P}_2 ds + \mathbf{P}_1 -$

сума прикладених ззовні тисків, поверхневих і точкових зусиль. Тут \mathbf{F} – вектор об'ємних сил, \mathbf{P}_2 – вектор поверхневих сил і \mathbf{P}_1 – вектор зосереджених у вузлах сил. В цих формулах (e) – номер розглядуваного елемента, E – загальна кількість елементів, на які розбито модель, $V^{(e)}$, $S^{(e)}$, – об'єм і площа конкретного одного розглядуваного елемента.

В результаті отримаємо скінчену систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно вектора переміщень у вузлах розбиття \mathbf{U} , яка в матричному представленні має вид:

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{f}. \quad (6)$$

На основі принципу д'Аламбера інерційні і дисипативні сили розподілені по об'єму, отже можуть розглядатися як частина об'ємних сил [4]. Взв'язавши до уваги інерційні сили в елементарному об'ємі $\rho \ddot{\mathbf{U}}$, де ρ – густина тіла і дисипативну силу $c \dot{\mathbf{U}}$, де c – коефіцієнт загасання в одиниці об'єму, який визначається експериментально; дискретизацію моделі на скінчене число елементів і лінійну

апроксимацію \mathbf{u} (1), для інерційної і дисипативної компонент об'ємної сили у правій частині рівності (5) маємо

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}, \quad (7)$$

де $\mathbf{M} = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} \rho_e \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{N}^{(e)} dv$,

$$\mathbf{f}_D = \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}, \quad (8)$$

де $\mathbf{C} = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} c_e \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{N}^{(e)} dv$,

де інерційна \mathbf{f}_i і дисипативна \mathbf{f}_D сили напрямлені проти руху, через що мають протилежний знак. Після перенесення \mathbf{f}_i , \mathbf{f}_D з рівностей (7), (8) у ліву частину рівняння (6) отримуємо рівняння руху у матричній формі:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{f}, \quad (9)$$

де $\mathbf{f} = \mathbf{f}_C + \mathbf{f}_P$ – сума концентрованих сил (джерел) і поверхневих сил на границях неоднорідних шарів, залежних від часу. Рівняння (9) є математичним виразом другого закону Ньютона. Матриця \mathbf{C} враховує загасання. Її можна визначити як суму: $\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$, по Релею, де коефіцієнти α і β визначаються в залежності від експериментальних даних [5].

Доповнивши систему звичайних диференціальних рівнянь (9) початковими умовами, в яких задаються значення переміщень і швидкостей переміщень в початковий момент часу у вузлах розбиття, тобто уже дискретизовані початкові умови:

$$\mathbf{U}_{t=0} = \mathbf{U}_0, \quad \dot{\mathbf{U}}_{t=0} = \dot{\mathbf{S}}_0. \quad (10)$$

Маємо постановку динамічної задачі для МСЕ. Для розв'язання системи (9)-(10) можуть застосовуватися різні підходи такі як метод розкладу по власних формах або ітераційні методи такі як методи центральних різниць, Хаболта, Ньюмарка або Θ -метод Вілсона [4, 6] або розроблені і апробовані авторами ітераційні схеми [7, 8].

Результати моделювання хвильових полів неоднорідного гірського масиву

Використовуючи розроблену методику було проведено моделювання хвильового поля для сейсмічного перерізу земної кори Дробишівської площі (рис. 1, 2)

При моделюванні МСЕ важливу роль відіграє сітка розбиття моделі. Розбиття, як показує практика, дає відчутний вплив на точність та частотний діапазон експерименту. тому враховуючи великі лінійні розміри моделі було проведено масштабування моделі.

Враховуючи, що використана модель є лінійною, було зменшено лінійні розміри на один порядок, а щоб це не відбилося на хвильовому полі було також знижено на один порядок швидкості поздовжніх та поперечних коливань середовища. Масштабування в свою чергу дало можливість використовуючи швидкодію та параметри сучасних персональних комп'ютерів добитися достатньо тонкого (сторона трикутника 2-3 м) розбиття для забезпечення необхідної точності експерименту.

На рис.3 показано модель шаруватого середовища, з нанесеною на неї сіткою розбиття, приймачі розміщені на вільній границі.

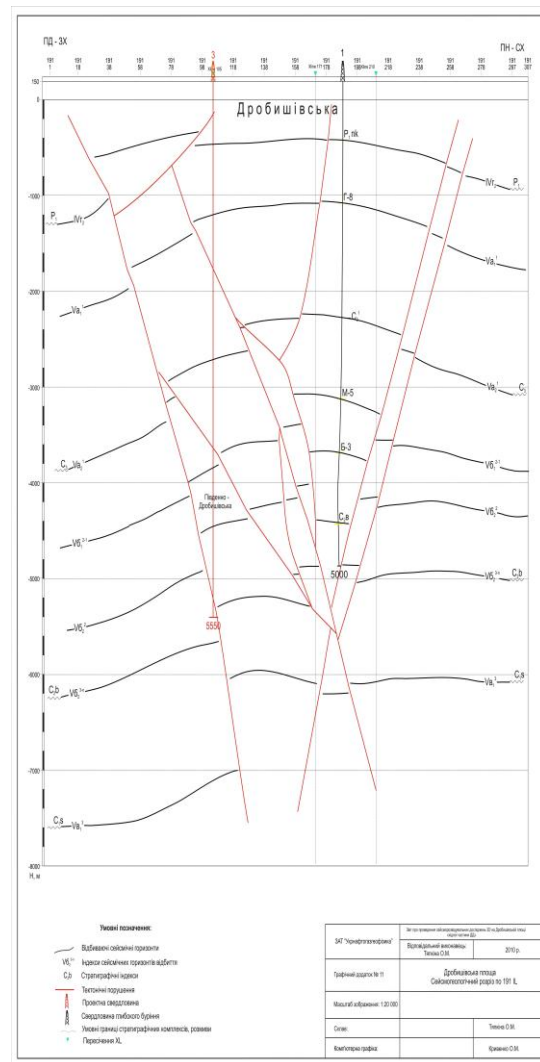


Рис. 1. Структурна схема Дробишівського родовища.

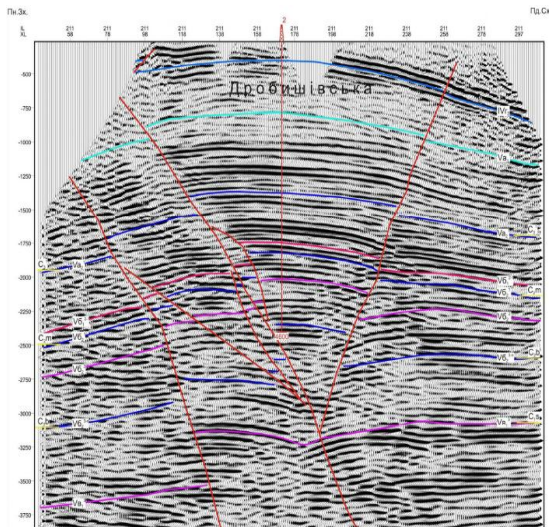


Рис. 2. Переріз часового міграного кубу по 211 ПЛ через проектну св.2.

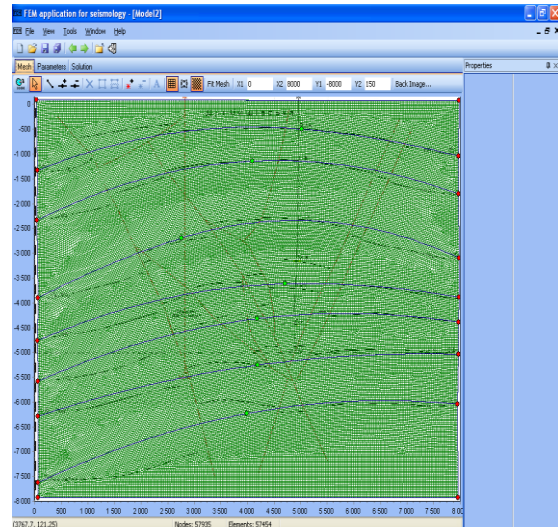


Рис.3 Модель шаруватого середовища побудована за існуючими геофізичними та сейсмічними даними

Аналіз результатів

На рис.4 – рис.7 представлені результати моделювання хвильового поля у випадку побудованої моделі – вертикальна (рис.4) та горизонтальна (рис.5) компоненти швидкості переміщення відповідно. На рис.7 показано спектр горизонтальної компоненти швидкості переміщення. Діапазон спектрів від 0 до 40 Гц вказує на достатню чутливість проведеного експерименту.

На приведених теоретичних сейсмограмах можна бачити характерні відбиття від верхніх шаруватих структур моделі, натомість після часів вступу 2.2с., через плавне зростання

швидкості поширення сейсмічних хвиль, на хвильовому полі не можемо побачити чітко виявлених горизонтів, а спостерігаємо лиш зашумленість моделі.

У таких випадках доцільно проводити дослідження окремих елементів хвильового поля, вплив ключових структурних елементів на загальне поле.

Програма дозволяє виділити окремі елементи структури, задати геофізичні параметри, побудувати сітку розбиття і проводити моделювання прямої динамічної задачі сейсміки для виділених зон у загальній структурі.

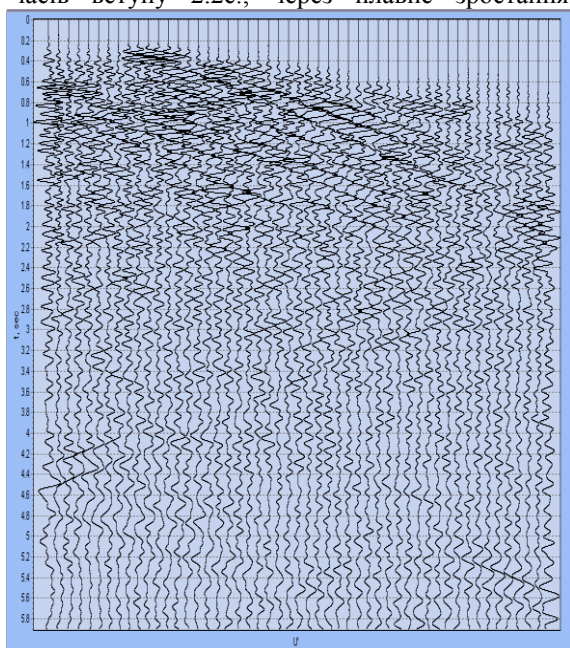


Рис.4. Вертикальна компонента швидкості переміщення

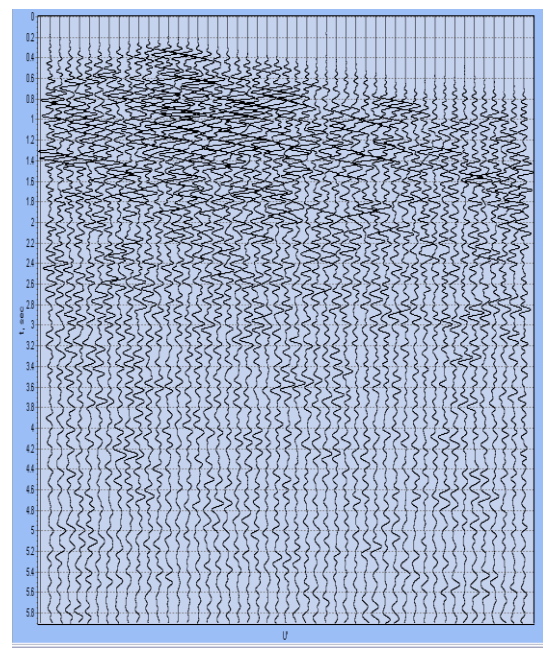


Рис.5. Горизонтальна компонента швидкості переміщення

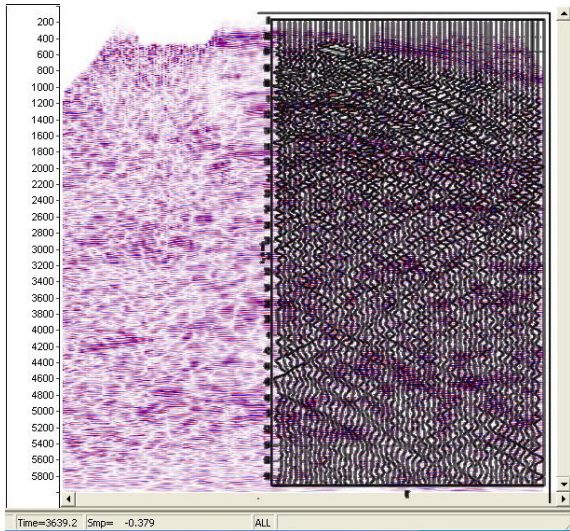


Рис. 6. зареєстроване хвильове поле порівнянне з результатами теоретичних розрахунків

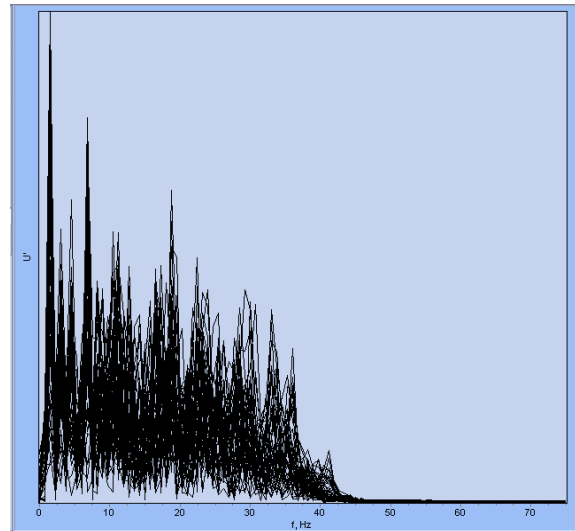


Рис.7 Спектр горизонтальної компоненти швидкості переміщення

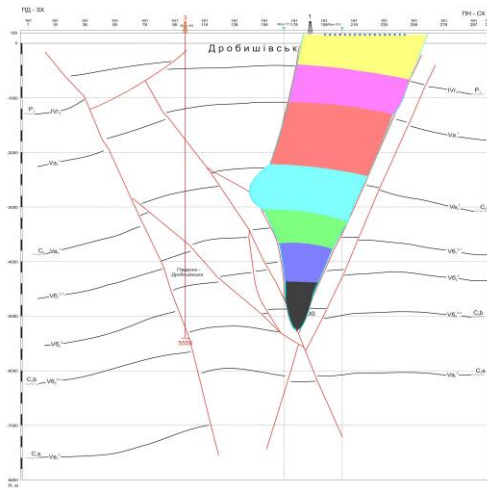


Рис.8 Виділена ділянка досліджень

На Рис.8 показано виділену ділянку для досліджень для даної ділянки. Приймачі розміщені на денній поверхні.

Таблиця 1.

V_p (м/с)	V_s (м/с)	ρ (кг/м ³)
3220	1660	1980
3180	1650	2180
4160	2280	2400
4340	2360	2500
4340	2300	2600
4300	2710	2500
4400	2750	2700

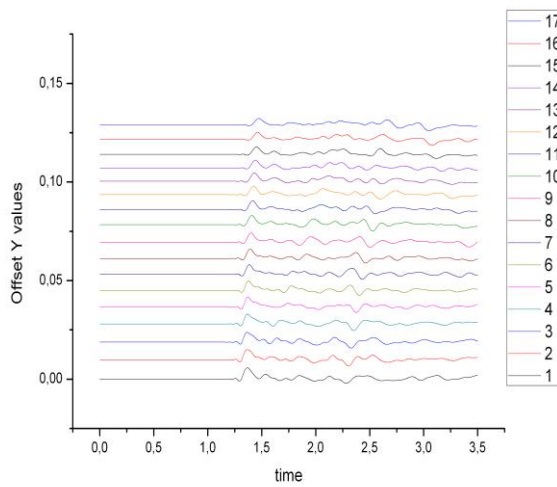


Рис.9. Вертикальна компонента переміщення

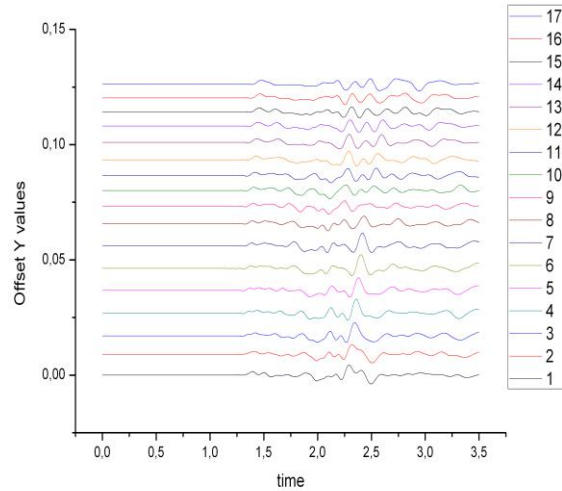


Рис.10. Горизонтальна компонента переміщення
Геофізичні параметри (швидкість поширення)

повздожніх V_p і поперечних хвиль V_s та густина ρ) середовища для окремо виділеної ділянки (рис.8) із загальної структури Дробишівського родовища подано у таблиці 1. На рис. 5 подано сітку розбиття цієї вибраної для моделювання ділянки.

Результати проведеного моделювання подано на рис 9 – вертикальна компоненту та рис. 10 – горизонтальна компонента переміщення

Висновки

У даній роботі представлено результати моделювання хвильового поля в неоднорідному гірському масиві Дробишівського газоконденсатного родовища з використанням представленої моделі півпростору. Показано суттєвий вплив горизонтальних і обмінних коливань на хвильове поле у випадку задач нафтогазової сейсморозвідки

Література

1. Ильющин А.А. Механика сплошной среды. - М.: Изд. Московского университета, - 1978. - 288 с.

2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. 2 т. - М.: Наука, - 1984. - 560 с.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. - М.: Наука, - 1975. - 576 с.
4. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. - М.: Стройиздат, - 1982. - 448 с.
5. К.-J. Bathe Finite element procedures in engineering analysis. - Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey., - 1982, - 738 p.
6. O.C. Zienkiewicz., R.L.Taylor. The finite element method. Fifth edition. V. 1-3. Oxford 2000.
7. Ю.П. Стародуб, О.В. Кендзера, Т.Б. Брыч, Б.Е. Купльовський. Математичне моделювання хвильових полів для дослідження сейсмічного стану інженерних об'єктів. Матеріали Міжнародної конференції «Геофізичні дослідження та моделювання фізичних полів Землі». Львів-Чинадієво. 16-18 вересня 2010 р. с.113 – 116.
8. Стародуб Ю.П., Т.Б. Брыч. Оцінка та прогнозування пластових і порових тисків у гірському масиві шляхом математичного моделювання. «Геодинаміка», 2009 р., №1(8), с.84-90.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТРУКТУРЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ю.П. Стародуб, Т.Б. Брыч, Б.Е. Купльовский

В работе представлены результаты моделирования сейсмического волнового поля на модели сечения земной коры (на примере Дробишівського газоконденсатного месторождения). Сложнопостроенный разрез земной коры, полученный геофизическим исследованием скважин, представлен в виде пластовой модели. При моделировании волнового поля сейсморазведки учитывались особенности двумерного сечения: продольные, поперечные и обменные волны, полученные на сейсмограммах продольных и поперечных колебаний.

Ключевые слова: моделирование, волновое поле, модель структуры, разрез земной коры, сейсморазведка.

WAVE FIELD SIMULATION USING FINITE ELEMENT METHOD ON THE GAS-CONDENSATE FIELD STRUCTURE

G.P. Starodub, T.B. Brych, B.Y. Kuplyovsky

The results of seismic wave field modeling on the cross-section model of the crust (for Drobyshevsk gas-condensate field example) were presented. Complicated cut of the crust, resulting geophysical study, represented as a reservoir model. When modeling, seismic wave field features of two-dimensional cross section were taken into account: longitudinal, transverse and exchange waves received on seismograms of longitudinal and transverse vibrations.

Keywords: modeling, wave field, the model structure, cut of the crust, seismic prospecting.