

МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА СТРУКТУРІ ДРОБИШІВСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

Наведено результати моделювання сейсмічного хвильового поля на моделі розрізу земної кори (на прикладі Дробишівського газоконденсатного родовища). Розріз земної кори, отриманий геофізичними дослідженнями свердловин, подано у вигляді пластової моделі. Під час моделювання хвильового поля сейсморозвідки враховано особливості двовимірного розрізу – поздовжні, поперечні та обмінні хвилі, одержані на сейсмограмах поздовжніх і поперечних коливань.

Ключові слова: моделювання; хвильове поле; модель структури; розріз земної кори; сейсморозвідка.

Вступ

Для досліджень родовищ вуглеводнів з геологічного погляду важливу роль відіграють методи математичного моделювання. Оскільки порівняно з експериментальними методиками вони мають ряд переваг, то такі підходи використовуються на більшості етапів досліджень.

У наш час існує велика кількість методів і методик розв'язання прямих динамічних задач сейсміки. Серед відомих методів своєю перспективністю виділяється методика розв'язання динамічної задачі сейсміки методом скінченних елементів (МСЕ). Підхід МСЕ для моделювання динамічних задач сейсміки має істотні переваги над іншими методами, тому що в його основу покладено енергетичний підхід для дослідження коливань середовища.

Основи розв'язання динамічної задачі теорії пружності методом скінченних 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 – елементів. Цими функціями можуть бути поліноми, що визначаються для кожного елемента зокрема. Порядок полінома залежить від форми елемента і кількості вузлів у елементі.

Використовуючи метод переміщень, у МСЕ вектор переміщень апроксимуємо на кожному скінченному елементі через значення переміщень у вузлах елемента – в матричному записі

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

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

Залежність між деформаціями і переміщеннями [Тимошенко, Гуд'єр, 1975; Ільющин, 1978; Седов, 1984] для елемента (e) можемо записати

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

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

Закон Гука запишемо

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

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

Введемо позначення для матриці жорсткості:

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

і вектора навантаження:

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

де $\mathbf{f}^{(e)} = \int_{V^{(e)}} \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{F} dv + \int_S \mathbf{N}^{(e)T} \mathbf{P}_2 ds + \mathbf{P}_1$ – 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. У цих формулах (e) – номер розглядуваного елемента, E – загальна кількість елементів, на які розділено модель, $V^{(e)}$, $S^{(e)}$, – об'єм і площа конкретного одного розглядуваного елемента.

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

$$\mathbf{K} \mathbf{U} = \mathbf{f}. \tag{6}$$

На основі принципу д'Аламбера інерційні та дисипативні сили розподілені по об'єму, отже, можуть розглядатися як частина об'ємних сил [Бате, Вилсон, 1982]. Взявши 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 скінченну кількість елементів і лінійну апроксимацію \mathbf{u} (1), для інерційної і дисипативної компонент об'ємної сили у правій частині рівності (5) маємо

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}}, \tag{7}$$

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

$$\mathbf{f}_D = \mathbf{C} \dot{\mathbf{U}}, \tag{8}$$

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

де інерційна f_i і дисипативна f_D сили спрямовані проти руху, через що мають протилежний знак. Після перенесення f_i , f_D з рівностей (7), (8) у ліву частину рівняння (6) отримуємо рівняння руху в матричній формі:

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

де $f = f_C + f_P$ – сума концентрованих сил (джерел) і поверхневих сил (залежних від часу) на границях неоднорідних шарів. Рівняння (9) є математичним виразом другого закону Ньютона. Матриця C враховує загасання. Її можна визначити як суму $C = \alpha M + \beta K$ за Релеєм, де коефіцієнти α і β визначаються залежно від експериментальних даних [Bathe, 2000].

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

$$U_{t=0} = U_0 , \quad \dot{U}_{t=0} = \dot{S}_0 . \quad (10)$$

Одержимо 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 [Бате, Вілсон, 1982; Zienkiewicz., Taylor, 2000], або розроблені й апробовані авторами ітераційні схеми [Стародуб, Брич, 2009; Стародуб та ін., 2010].

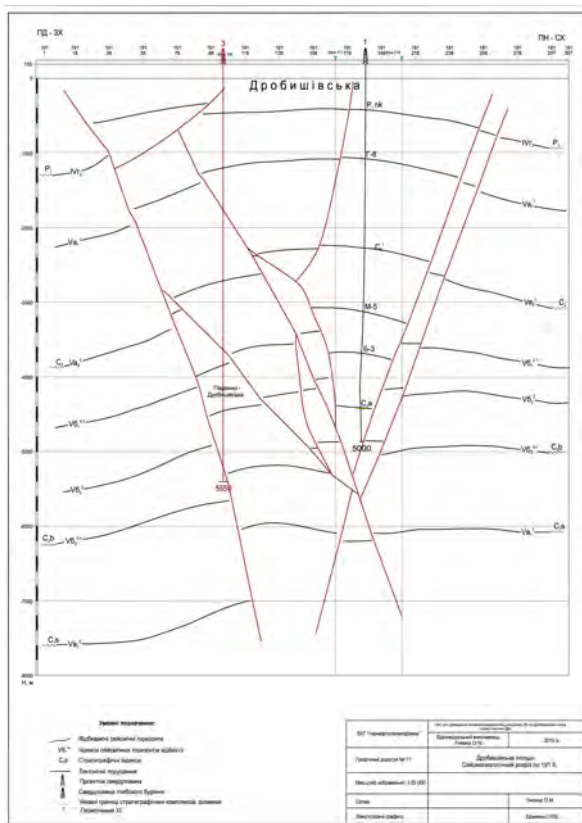
Результати моделювання хвильових полів неоднорідного гірського масиву

З використанням розробленої методики здійснено моделювання хвильового поля для сейсмічного перерізу земної кори Дробишівської площі (рис. 1).

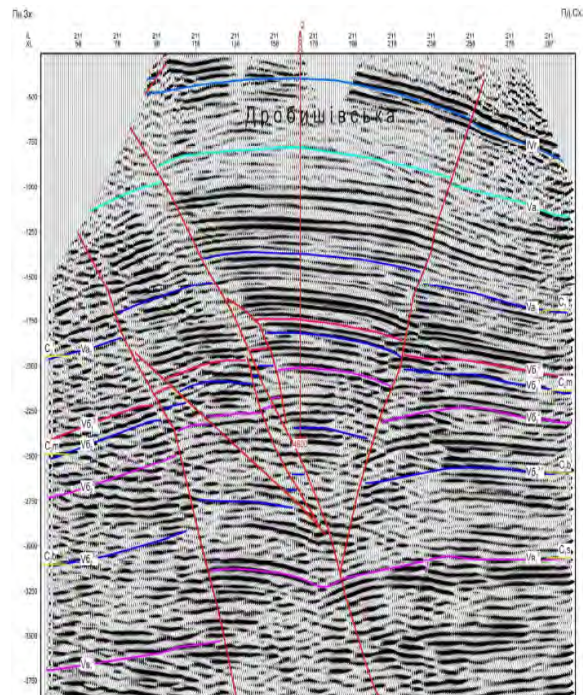
У моделюванні МСЕ важливу роль відіграє сітка розбиття моделі. Розбиття, як показує практика, відчутно впливає на точність та частотний діапазон експерименту. Тому, враховуючи великі лінійні розміри моделі, було проведено її масштабування.

Враховуючи, що використана модель є лінійною, було зменшено її лінійні розміри на один порядок, а щоб це не відбилося на хвильовому полі, також знижено на один порядок швидкості поздовжніх та поперечних хвиль для середовища. Масштабування, своєю чергою, дало змогу, використовуючи швидкодню та параметри сучасних персональних комп'ютерів, добитись достатньо детального і тонкого (сторона трикутника 2–3 м) розбиття для забезпечення необхідної точності експерименту.

На рис. 2 показано створену модель шаруватого середовища, побудовану за наявними геофізичними та сейсмічними даними, з нанесеною на неї сіткою розбиття. Приймачі розміщені на вільній границі (на денній поверхні).



а



б

Рис. 1. Структурна схема Дробишівського родовища (а) та переріз часового мігрованого куба даних для нього по профілю 211 ПЛ через проектну св. 2 (б)

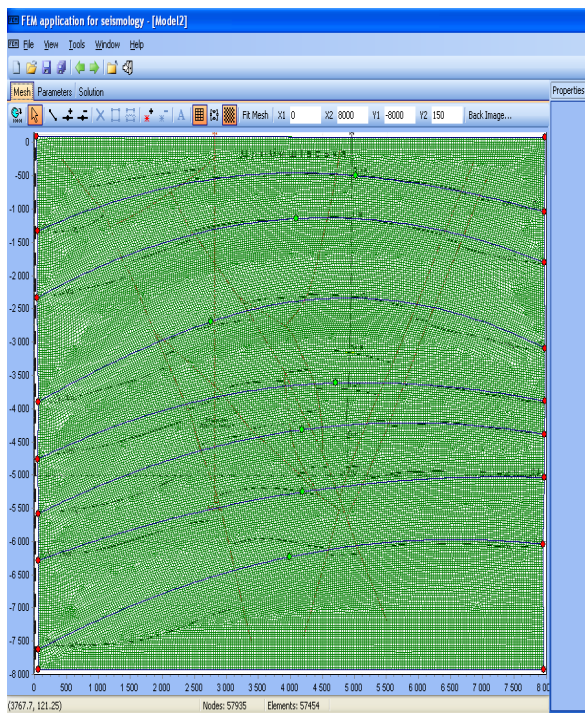
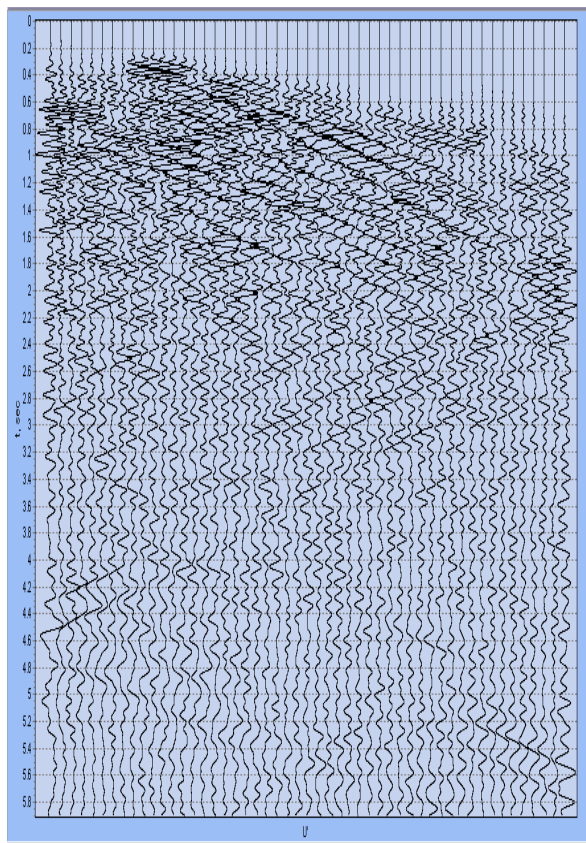
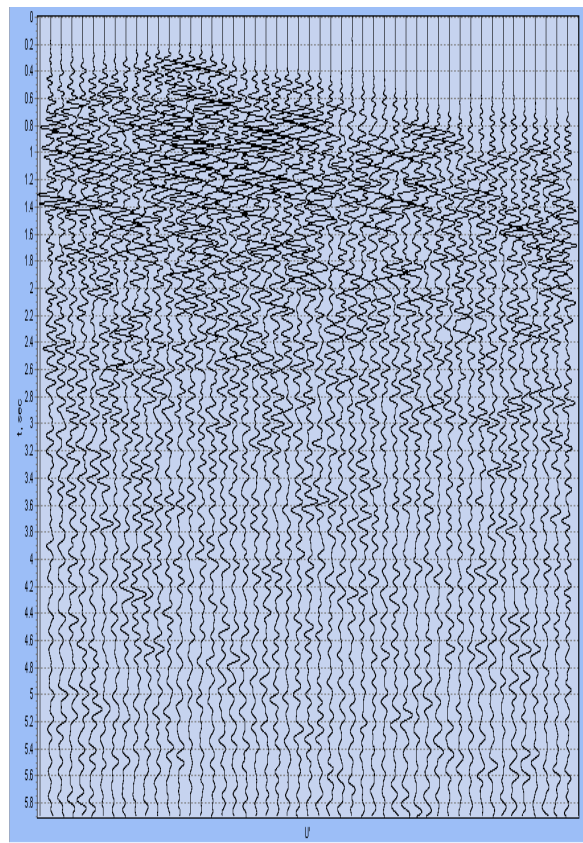


Рис. 2. Модель шаруватого середовища для Дробишівського родовища



а



б

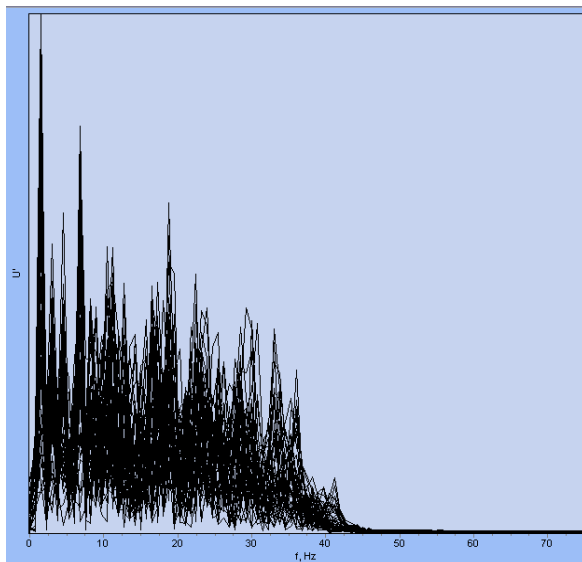
Рис. 3. Вертикальна (а) та горизонтальна (б) розраховані компоненти хвильового поля (швидкості переміщень) для моделі шаруватого середовища Дробишівського родовища

Аналіз результатів

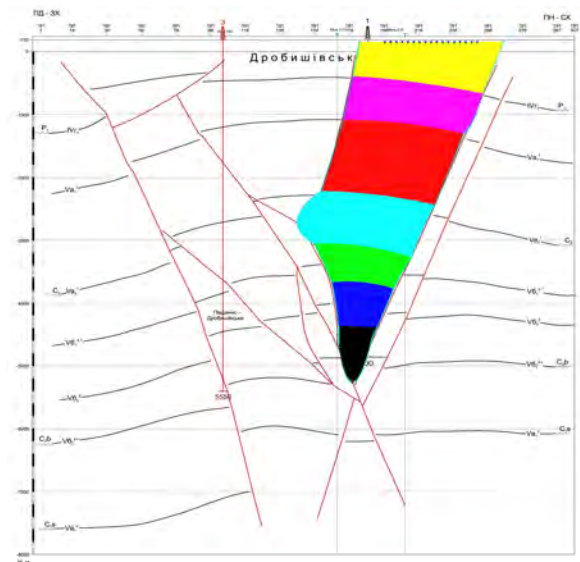
На рис. 3–5 наведено результати моделювання хвильового поля для побудованої моделі – вертикальна (рис. 3, а) та горизонтальна (рис. 3, б) компоненти швидкості переміщень відповідно. На рис. 4, а показано спектр горизонтальної компоненти швидкості переміщень. Діапазон частот від 0 до 40 Гц вказує на достатню якість проведеного математичного моделювання.

На наведених теоретичних сейсмограмах можна побачити характерні відбиття від верхніх шаруватих структур моделі, натомість після часів вступу 2,2 с через плавне зростання швидкості поширення сейсмічних хвиль у хвильовому полі не простежуються чітко окремі горизонти, а спостерігаємо лише його зашумленість.

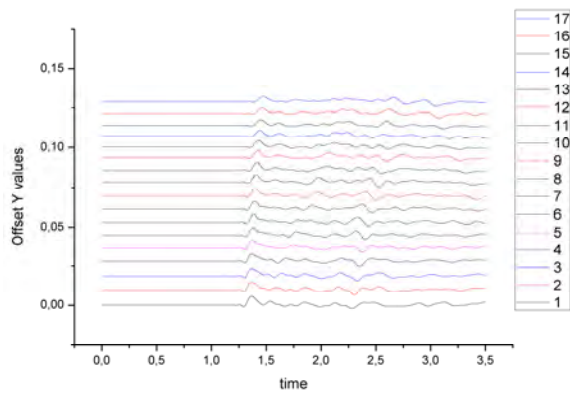
У таких випадках доцільно досліджувати окремі елементи хвильового поля та впливу на нього ключових структурних елементів моделі. Програма дає змогу виділити окремі елементи структури, задати геофізичні параметри, побудувати сітку розбиття і виконати моделювання прямої динамічної задачі сейсміки для виділених у загальній структурі конкретних зон. На рис. 4, б показано таку виділену для детальніших досліджень зону. Приймачі розміщені на денній поверхні.



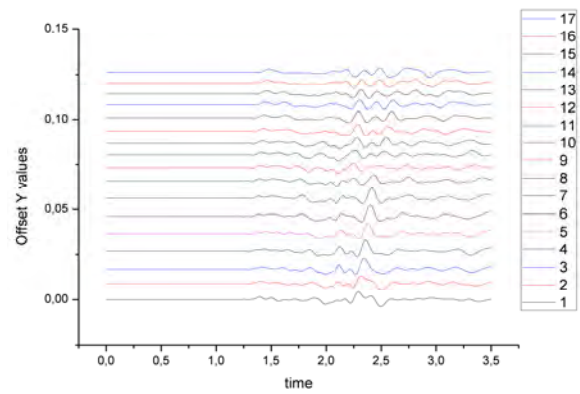
а



б



в



г

Рис. 4. Спектр горизонтальної компоненти швидкості переміщень (а), виділена для детальних досліджень зона структури Дробишівського родовища (б) і вертикальна (в) та горизонтальна (г) компоненти переміщень для неї

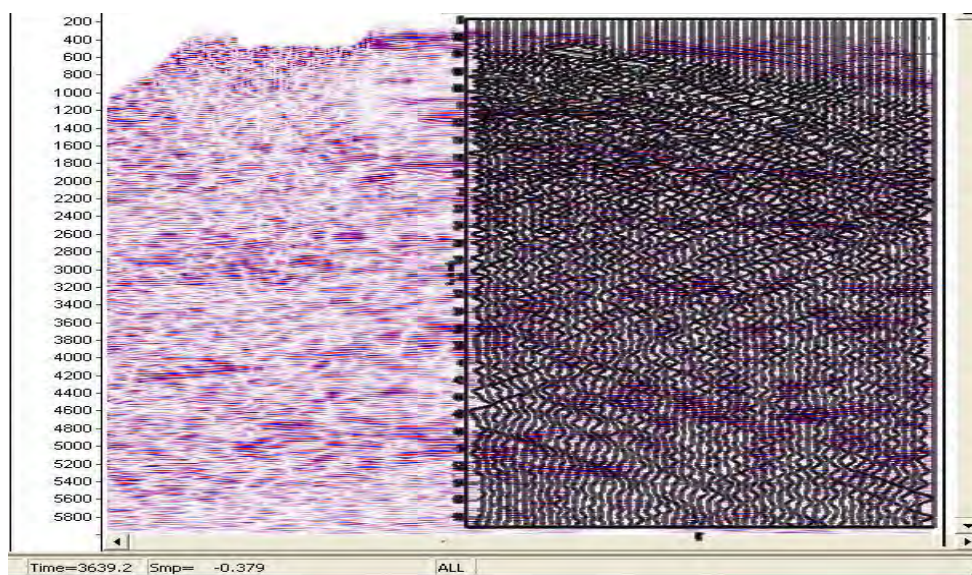


Рис. 5. Порівняння зареєстрованого та розрахованого хвильових полів для структури Дробишівського родовища

**Геофізичні параметри для виділеної зони
структури Дробишівського родовища**

№ шару	V_P , м/с	V_S , м/с	ρ , кг/м ³
1	3220	1660	1980
2	3180	1650	2180
3	4160	2280	2400
4	4340	2360	2500
5	4340	2300	2600
6	4300	2710	2500
7	4400	2750	2700

Геофізичні параметри середовища (швидкість поширення поздовжніх (V_P) і поперечних (V_S) хвиль та густина ρ) для шарів виділеної ділянки (див. рис. 4, б) із загальної структури Дробишівського родовища подано у таблиці. Результати проведеного моделювання наведено на рис. 4 – вертикальна (в) та горизонтальна (г) компоненти переміщень.

Висновки

У роботі подано результати моделювання хвильового поля в неоднорідному гірському масиві Дробишівського газоконденсатного родовища з використанням побудованої за геолого-геофізичними даними моделі півпростору. Показано істотний вплив горизонтальних і обмінних хвиль на

загальне хвильове поле при розв'язанні задач нафтогазової сейсмозвідки.

Література

- Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
- Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. – М.: Изд. МГУ. – 1978. – 288 с.
- Седов Л.И. Механика сплошной среды. 2 т. – М.: Наука, 1984. – 560 с.
- Стародуб Ю.П., Брыч Т.Б. Оцінка та прогнозування пластових і порових тисків у гірському масиві шляхом математичного моделювання // Геодинаміка. – 2009. – № 1(8). – С. 84–90.
- Стародуб Ю.П., Кендзера О.В., Брыч Т.Б., Купльовський Б.Є. 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. – Львів. – 2010. – С. 113–116.
- Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
- Bathe K.-J. Finite element procedures in engineering analysis. – Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. – 1982. – 738 p.
- Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Fifth edition. V. 1–3. Oxford 2000.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
НА СТРУКТУРЕ ДРОБЫШИВСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

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

В работе представлены результаты моделирования сейсмического волнового поля на модели сечения земной коры (на примере Дробышевского газоконденсатного месторождения). Разрез земной коры, полученный геофизическим исследованием скважин, представлен в виде пластовой модели. При моделировании волнового поля сейсмозвездки 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; сейсмозвездка.

**WAVE FIELD SIMULATION USING FINITE ELEMENT METHOD
ON THE DROBYSHIVSKE 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. The cut of the crust which resulting the boreholes geophysical studies is 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.

Key words: modeling; wave field; the model of structure; cut of the crust; seismic prospecting.