

В.П. Нагорний, І.І. Денисюк, Я.О. Юшицина

ПІДВИЩЕННЯ НАФТОГАЗОВІДДАЧІ ПЛАСТІВ СПОСОБОМ АКУСТИЧНОЇ ДІЇ

Розроблено метод передачі акустичної енергії в геосередовище за обробки нафтогазових пластів бігармонічною дією. Це сприяє глибшій імпульсній обробці пласта з метою підвищення його нафтогазовіддачі.

Ключові слова: акустичні хвилі, геосередовище, нелінійне рівняння.

Відомо, що з метою підвищення нафтогазовіддачі пластів застосовують акустичні методи дії [1]. У більшості розроблених акустичних методів дії на пласт не враховано нелінійні властивості середовищ. Не з'ясований повністю механізм такої дії. У зв'язку з цим науковий та практичний інтерес становить вивчення механізму поширення акустичних хвиль у нелінійних середовищах, якими є пласти колектори нафти і газу.

Основні рівняння одновимірного плоского руху в змінних Лагранжа x і t [3] мають вигляд

$$\begin{cases} \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0; \\ \rho_0 = \rho \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right); \\ p = p(\rho) = p_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \end{cases} \quad (1)$$

де $u(x, t)$ – зміщення часток середовища зі свого початкового положення x ; p, p_0 – змінний та початковий тиск відповідно; ρ, ρ_0 – змінна та початкова густина середовища відповідно; γ – показник адіабати Пуассона.

Перше рівняння – це узагальнення другого закону Ньютона для суцільного середовища. Друге – рівняння неперервності – закон збереження маси речовини, представлений у диференціальній формі. Третє – рівняння стану у формі адіабати Пуассона.

Для гірських порід рівняння стану можна записати у формі Тета [4]:

$$p = p_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (2)$$

де $p_0 = 785 \cdot 10^8$ Па, $\gamma = 7,55$ (для вапняку);
 $p_0 = 8,35 \cdot 10^7$ Па, $\gamma = 7,51$ (для алевроліту).

Два останні рівняння системи (1) наведемо у вигляді

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \partial u / \partial x}; \quad p = p(\rho) = p_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{\partial u}{\partial x}} \right)^\gamma. \quad (3)$$

Для рівняння стану виду (2) отримаємо

$$p = p_0 \left(\frac{1}{1 + \frac{\partial u}{\partial x}} \right)^\gamma - p_0. \quad (4)$$

Із (3) і (4) видно, що густина і тиск є функціями лише однієї змінної $\frac{\partial u}{\partial x}$. Це означає, що система (1) має розв'язок у вигляді простих хвиль.

Підставивши рівняння стану з (4) в праву частину першого рівняння (1), одержуємо нелінійне рівняння Ірншоу [5]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 u / \partial x^2}{(1 + \partial u / \partial x)^{\gamma+1}}, \quad (5)$$

де $c_0^2 = \frac{\gamma p_0}{\rho_0}$ – квадрат рівноважної швидкості поширення звуку.

Рівняння (5) містить нелінійність загального вигляду і формально придатне для опису сильних збурень. Проте потрібно, щоб знаменник виразу (5) не дорівнював нулю $\left(\frac{\partial u}{\partial x} \neq -1 \right)$. У нелінійній акустиці мають справу зі слабо нелійними хвилями, для яких $\left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \ll 1$ [4].

Вважаючи нелінійність слабкою, спростимо рівняння Ірншоу (5), зберігши в ньому лише два головні нелінійні члени.

Скористаємося наближеним співвідношенням для знаменника (5):

$$\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^{-(\gamma+1)} = 1 - (\gamma+1) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} (\gamma+1)(\gamma+2) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2. \quad (6)$$

Підставивши розклад (6) у праву частину рівняння Ірншоу (5), знаходимо

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\gamma+1) \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \\ &- \frac{1}{2} (\gamma+1)(\gamma+2) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Ліва частина (7) – це звичайне лінійне хвильове рівняння. Права частина містить квадратично-нелінійний і кубічно-нелінійний члени.

Відомо, що в нелінійних середовищах порушується принцип суперпозиції хвильових збурень [2]. Загалом за довільних частот ω_1 і ω_2 складових сигналів картина руху виявляється дуже складною. Однак деякі особливості взаємодії хвиль можуть бути досліджені.

Припустимо, що на вході нелінійного середовища ($x = 0$) діє бігармонічний сигнал:

$$u = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t, \quad (8)$$

де A_1 і A_2 , ω_1 і ω_2 – амплітуди і частоти складових сигналів відповідно.

Задача полягає в тому, щоб, проаналізувавши рівняння (7) методом послідовних наближень, визначити, які частоти можуть виникати за поширення бігармонічного сигналу (8) в нелінійному геосередовищі.

Вважаючи нелінійні ефекти слабкими, у першому наближенні нехтуємо у рівнянні (7) його правою частиною. При цьому одержимо лінійне хвильове рівняння

$$\frac{du_1}{dx^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{d^2 u_1}{dt^2} = 0,$$

розв'язок якого має вигляд

$$u_1(x, t) = A_1 \sin \omega_1 \tau + A_2 \sin \omega_2 \tau, \quad (9)$$

де $\tau = t - \frac{x}{c_0}$.

Щоб знайти розв'язок другого наближення $u_2(x, t)$, необхідно підставити в праву частину нелінійного рівняння (7) відповідні похідні функції (9).

Із (9) визначимо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial x} &= A_1 \cos \omega_1 \tau \left(-\frac{\omega_1}{c_0} \right) + A_2 \cos \omega_2 \tau \left(-\frac{\omega_2}{c_0} \right); \\ \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} &= -A_1 \sin \omega_1 \tau \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right)^2 - A_2 \sin \omega_2 \tau \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right)^2; \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} &= A_1 \cos \omega_1 \tau (\omega_1) + A_2 \cos \omega_2 \tau (\omega_2); \\ \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} &= -A_1 \sin \omega_1 \tau (\omega_1^2) - A_2 \sin \omega_2 \tau (\omega_2^2). \end{aligned} \quad (10)$$

Підставивши співвідношення (10) в праву частину рівняння (7), після перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} F(\omega, \tau) &= \frac{(\gamma+1)}{2} \left\{ A_1^2 \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right)^3 \sin 2\omega_1 \tau + A_2^2 \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right)^3 \sin 2\omega_2 \tau + \right. \\ &+ A_1 A_2 \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right) \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right) \left[\frac{\omega_2}{c_0} (\sin(\omega_1 + \omega_2) \tau - \sin(\omega_1 - \omega_2) \tau) + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left. \left. + \frac{\omega_1}{c_0} (\sin(\omega_1 + \omega_2) \tau + \sin(\omega_1 - \omega_2) \tau) \right] \right\} + \\ &+ \frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{4} \left\{ A_1^3 \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right)^4 \cos \omega_1 \tau \sin 2\omega_1 \tau + \right. \\ &+ A_1^2 A_2 \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right)^2 \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right)^2 \cos \omega_1 \tau \times \\ &\times \left[\sin(\omega_1 + \omega_2) \tau - \sin(\omega_1 - \omega_2) \tau \right] + 2A_1^2 A_2 \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right)^3 \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right) \times \\ &\times \cos \omega_2 \tau \sin 2\omega_1 \tau + 2A_1 A_2^2 \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right) \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right)^3 \cos \omega_1 \tau \sin 2\omega_2 \tau + \\ &+ A_2^2 A_1 \left(\frac{\omega_1}{c_0} \right)^2 \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right)^2 \cos \omega_2 \tau \times \\ &\times \left[\sin(\omega_1 + \omega_2) \tau + \sin(\omega_1 - \omega_2) \tau \right] + \\ &\left. + A_2^3 \left(\frac{\omega_2}{c_0} \right)^4 \cos \omega_2 \tau \sin 2\omega_2 \tau \right\}. \quad (11) \end{aligned}$$

Рівняння другого наближення з правою частиною (11) буде таким:

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = F(\omega, \tau), \quad (12)$$

де $F(\omega, \tau)$ – змушувальна сила, яка визначається виразом (11).

Через громіздкість проведення обчислювальних процедур розв'язок нелінійного хвильового рівняння (12) не наводимо. Зазначимо лише, проаналізувавши праву частину рівняння (12), що в нелінійному середовищі під час дії на нього бігармонічних хвиль генеруються й інші гармоніки з частотами $2\omega_1$, $2\omega_2$ хвиль вихідних частот, а також збурення на сумарній $\omega_1 + \omega_2$ і різницевої $\omega_1 - \omega_2$ частотах.

У роботі [5] зауважено, що за взаємодії двох плоских хвиль з частотами ω_1 і ω_2 комбінаційний тон, що відповідає різницевої частоті $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ у нелінійному середовищі, загасає набагато повільніше первинних взаємодіючих хвиль. Це може зумовити перевищення на деякій відстані від випромінювача інтенсивності комбінаційного тону над інтенсивністю вихідних хвиль із зміщенням спектрального максимуму процесу в діапазон нижчих частот.

Як видно із співвідношення (11), за взаємодії двох хвиль з частотами ω_1 і ω_2 генеруються амплітудно-модульовані сигнали виду

$$\begin{aligned} u_{2,1} &= B_1 \cos \omega_2 \tau \cdot \sin(\omega_1 - \omega_2) \tau; \\ u_{2,2} &= B_2 \cos \omega_1 \tau \cdot \sin(\omega_1 - \omega_2) \tau \end{aligned} \quad (13)$$

та ін. Це приводить до стану, коли хвилі типу (13), що виникають, слабо загасаючи, посту-

пово можуть перевищити за інтенсивністю хвилі носійних частот.

Отже, метод бігармонічної дії на нелінійне середовище є одним із ефективних методів передачі акустичної енергії в геосередовище і перспективним для імпульсної обробки пласта у віддалених його частинах, що сприяє глибшій імпульсній обробці пласта з метою підвищення його нафтогазовіддачі.

1. *Афанасенков И.И.* Опыт и перспективы промышленного использования акустического воздействия в раз-

личных скважинах / И.И. Афанасенков, Е.Ф. Жуйков // Нефт. хоз-во. – 1999. – № 12. – С. 16–19.

2. *Грінченко В.Т.* Основы акустики / Грінченко В.Т., Вовк І.В., Мацапура В.Т. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с.
3. *Зарембо Л.К.* Нелинейная акустика / Л. Зарембо, В. Тимошенко. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 104 с.
4. *Поздеев В.А.* Импульсные возмущения в газожидкостных средах / Поздеев В.А., Бескаравайный П.М., Ковалев В.Г. / Отв. ред. В.В. Дыхта. – К.: Наук. думка, 1988. – 116 с.
5. *Руденко О.В.* Нелинейная акустика в задачах и примерах / О. Руденко, С. Гурбатов, К. Хедберг. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 16.03.2012 р.

В.П. Нагорный, И.И. Денисюк, Я.А. Юшицына

ПОВЫШЕНИЕ НЕФТЕГАЗООТДАЧИ ПЛАСТОВ ПУТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Разработан метод передачи акустической энергии в геосреду путем обработки нефтегазовых пластов бигармоническим действием. Это способствует более глубокой импульсной обработке пласта с целью повышения его нефтегазоотдачи.

Ключевые слова: акустические волны, геосреда, нелинейное уравнение.

V.P. Nagorniy, I.I. Denisyuk, Ya.O. Yushytsyna

THE INCREASE OF GAS-OIL OUTPUT LAYERS BY MEANS OF ACOUSTIC INFLUENCE

Given in the article is a method of transport of acoustic energy in geophysical medium using biharmonic processing of gas and oil layers. The method makes it possible to do the deeper impulse treatment of a layer for the purpose of increasing gas-oil output.

Keywords: acoustic waves, geophysical medium, nonlinear equation.