

© В.П. Нагорний

д-р техн. наук

І.І. Денисюк

канд. техн. наук

Я.О. Юшицина

ІГФ НАН України

В.М. Ліхван

ГВУ «Полтавагазвидобування»

Оброблення вуглеводневих пластів бігармонічною акустичною хвилею

УДК 532.595

Досліджено частоти та амплітуди коливань, що генеруються нелінійним дисипативним середовищем у процесі оброблення його бігармонічним акустичним сигналом при числах Рейнольдса $Re \ll 1$ і $Re \gg 1$. Особливості трансформації акустичних полів під час бігармонічного оброблення порід-колекторів нафти і газу доцільно враховувати під час розробки нових перспективних технологій вилучення вуглеводнів із продуктивних пластів.

Ключові слова: амплітуда, дисипація, нелінійність, середовище, частота.

Исследованы частоты и амплитуды колебаний, генерирующиеся нелинейной диссипативной средой пласта в процессе обработки ее бигармоническим акустическим сигналом при числах Рейнольдса $Re \ll 1$ и $Re \gg 1$. Особенности трансформации акустических полей при бигармонической обработке пород-коллекторов нефти и газа целесообразно учитывать в процессе разработки новых перспективных технологий извлечения углеводородов из продуктивных пластов.

Ключевые слова: амплитуда, диссипация, нелинейность, среда, частота.

Frequencies and amplitudes of vibrations generated by nonlinear dissipative medium as it is being under the effect of a biharmonic acoustic signal at Reynolds numbers of $Re \ll 1$ and $Re \gg 1$ have been investigated. It is reasonable to consider the specifics of acoustic field transformation during the biharmonic treatment of oil and gas reservoir rocks when developing advanced technologies for hydrocarbons extraction from the pay formations.

Key words: amplitude, dissipation, nonlinearity, medium, frequency.

Акустичні методи оброблення вуглеводневих пластів гармонічними хвилями з метою підвищення видобутку вуглеводнів набули широкого застосування в нафтогазовій галузі [1–4]. Проте відомі методи не враховують нелінійності середовища та дисипативних втрат енергії хвильових збурень у процесі розповсюдження їх у середовищі пласта. Подальшим розвитком акустичних методів є використання у ході оброблення вуглеводневих пластів дії бігармонічних акустичних хвиль. Це дає можливість провадити оброблення продуктивних пластів у більш широкому частотному діапазоні порівняно з гармонічним обробленням на одній фіксованій частоті, що сприяє підвищенню ефективності акустичної дії.

Деякі аспекти розповсюдження бігармонічних хвиль у нелінійних геофізичних середовищах висвітлено в роботах [5, 6].

У цій статті мова йтиме про дослідження бігармонічної дії акустичних хвиль у нелінійному дисипативному геофізичному середовищі пласта, проведені на основі рівняння Бюргерса [7, 8]:

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\varepsilon}{c^2} v \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2}, \quad (1)$$

де v – масова (коливальна) швидкість руху; c – швидкість звуку в середовищі; ρ – густина середовища; ε – показник нелінійності; b – коефіцієнт дисипації; $\tau = t - \frac{x}{c}$.

Із використанням модельного рівняння (1) досліджено поширення бігармонічного збурення, яке задається в точці $x=0$, у вигляді:

$$v = v_{01} \sin \omega_1 \tau + v_{02} \sin \omega_2 \tau \quad (2)$$

де ω_1, ω_2 – кругові частоти плоских хвиль, що діють у геосередовищі.

Зауважимо, що число Рейнольдса Re характеризує вплив нелінійних і дисипативних факторів у геосередовищі в процесі розповсюдження в ньому хвиль збурення. Дослідження спочатку проведено за малих значень числа Рейнольдса $Re = \frac{v_0 \rho c}{b \omega} \ll 1$.

Відомо [8], що під час дії збурення (2) у дисипативному середовищі генеруються хвилі другого наближення розв'язку рівняння (1) на частотах $2\omega_1, 2\omega_2, \omega_1 + \omega_2$ і $\omega_1 - \omega_2$.

Дослідимо поведінку збурень на частоті $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ у дисипативному геосередовищі. Диференціальне рівняння для визначення другого наближення швидкості v акустичної хвилі на частоті Ω має вигляд [6]:

$$\frac{\partial v_{\Omega}^{(2)}}{\partial x} - \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 v_{\Omega}^{(2)}}{\partial \tau^2} = \left(\frac{-\varepsilon \Omega v_{01} v_{02}}{2c^2} \right) e^{-(a_1 + a_2)x} \sin \Omega \tau, \quad (3)$$

$$\text{де } \alpha_1 = \frac{b\omega_1^2}{2\rho c^3}, \quad \alpha_2 = \frac{b\omega_2^2}{2\rho c^3}. \quad (4)$$

Розв'язок неоднорідного диференційного рівняння (3) (із урахуванням умови на границі $x=0, v_{\Omega}^{(2)} = 0$) має вигляд:

$$v_{\Omega}^{(2)} = \left(e^{-(\alpha_1+\alpha_2)x} - e^{-\frac{b\Omega^2 x}{2\rho c^3}} \right) \frac{\rho c \varepsilon \Omega v_{01} v_{02}}{2b\omega_1 \omega_2} \sin \Omega \tau. \quad (5)$$

Як видно із виразу (5), амплітуда хвилі $v_{\Omega}^{(2)}$ зростає від нуля при $x=0$ і досягає максимального значення в точці x_m , яка визначається із умови $\frac{\partial v_{\Omega}^{(2)}}{\partial x} = 0$. Із цієї умови знаходимо, що

$$x_m = \frac{\rho c^3}{b\omega_1 \omega_2} \ln \left(\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{\Omega^2} \right). \quad (6)$$

Після досягнення максимуму амплітуда хвилі $v_{\Omega}^{(2)}$ зменшується. Затухання хвилі визначається коефіцієнтом

$$\alpha_{\Omega} = b\Omega^2 / 2\rho c^3. \quad (7)$$

Порівняємо амплітуди хвиль на частоті Ω та одній із основних частот $2\omega_1$. Диференційне рівняння для знаходження другого наближення швидкості v акустичної хвилі на частоті $2\omega_1$ має вигляд:

$$\frac{\partial v_{2\omega_1}^{(2)}}{\partial x} - \frac{b}{2\rho c^3} \frac{\partial^2 v_{2\omega_1}^{(2)}}{\partial \tau^2} = \frac{\varepsilon \omega_1}{2c^2} v_{01}^2 e^{-2\alpha_1 x} \sin 2\omega_1 \tau. \quad (8)$$

Розв'язок неоднорідного диференційного рівняння за нульових граничних умов (при $x=0, v_{2\omega_1}^{(2)} = 0$) такий:

$$v_{2\omega_1}^{(2)} = \frac{\varepsilon \omega_1 v_{01}^2}{4\alpha_1 c^2} \left(e^{-2\alpha_1 x} - e^{-4\alpha_1 x} \right) \sin 2\omega_1 \tau. \quad (9)$$

Із умови $\frac{\partial v_{2\omega_1}^{(2)}}{\partial x} = 0$ знаходимо, що амплітуда хвилі на частоті $2\omega_1$ досягає максимального значення у точці

$$x_m = \ln 2 / 2\alpha_1. \quad (10)$$

Порівняння амплітуд швидкостей v хвиль на частотах Ω і $2\omega_1$ проведено за таких вихідних даних. Геофізичне середовище пласта (пісковик) характеризується параметрами: $\rho=2630$ кг/м³; $c=6010$ м/с; $\varepsilon=4,32$; $b=2,6 \times 10^5$ Па·с. Бігармонічний сигнал має такі характеристики: $\omega_1=30,1$ кГц; $\omega_2=30$ кГц; $v_{01}=v_{02}=5$ м/с; $\Omega=\omega_1-\omega_2=100$ Гц; $Re=0,01$.

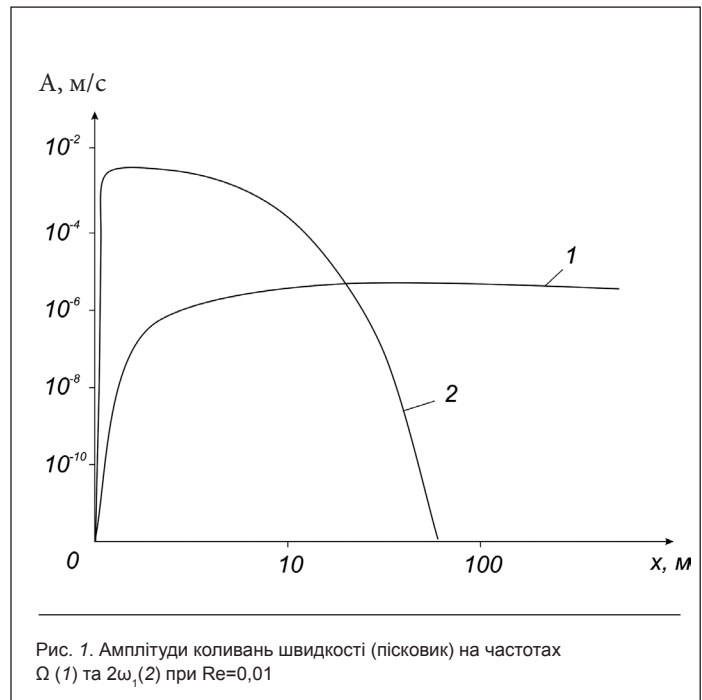


Рис. 1. Амплітуди коливань швидкості (пісковик) на частотах Ω (1) та $2\omega_1$ (2) при $Re=0,01$

За вказаних параметрів із виразів (5) і (9) з урахуванням співвідношень (4) та (7) отримано залежності для визначення швидкостей коливань v на частотах Ω і $2\omega_1$:

$$v_{2\omega_1}^{(2)} = 2,1813 \cdot 10^{-2} \left(e^{-0,4126x} - e^{-0,8252x} \right) \sin 2\omega_1 \tau = A_{v_{2\omega_1}^{(2)}} \sin 2\omega_1 \tau, \quad (11)$$

$$v_{\Omega}^{(2)} = 2,1813 \cdot 10^{-2} \left(e^{-0,4126x} - e^{-0,8252x} \right) \sin 2\omega_1 \tau = A_{v_{\Omega}^{(2)}} \sin 2\omega_1 \tau.$$

За виразами (11) розраховано залежно від відстані x до джерела дії бігармонічного сигналу амплітуди коливань швидкостей $v_{\Omega}^{(2)}, v_{2\omega_1}^{(2)}$, які представлено на рис. 1. Розраховані за формулами (6) та (10) максимальні значення амплітуд коливань швидкостей на частотах $\Omega, 2\omega_1$ досягаються в точках $x_m = 29,43$ та $x_m = 1,68$ м відповідно.

Як видно із рис. 1, хвиля на частоті $2\omega_1$ спочатку інтенсивно зростає з відстанню x до максимального значення, а потім різко згасає. Вже на відстані 60 м (для умов цього прикладу) вона становить $3,866 \cdot 10^{-13}$ м/с (практично досягає нульового значення).

В області відстаней $x=0 \dots 20$ м від джерела дії бігармонічного сигналу (до точки перетину кривих 1, 2 на рис. 1) амплітуда хвилі на частоті $2\omega_1$ перевищує значення амплітуди на частоті Ω . Але вже з відстані $x > 20$ м інтенсивність хвилі на частоті Ω більша за інтенсивність хвилі на частоті $2\omega_1$, тобто відбувається зміщення спектрального максимуму процесу в область низьких частот. Це викликано тим, що хвиля на різнищевій низькій частоті Ω в області $x > 20$ м згасає слабкіше порівняно з хвилею на частоті $2\omega_1$.

Розглянемо інший граничний випадок, коли число Рейнольдса $Re \gg 1$, тобто дисипація середовища мала або практично відсутня $b \rightarrow 0$. У цьому випадку рівняння (3) та (8) набувають вигляду:

$$\frac{\partial v_{\Omega}^{(2)}}{\partial x} = \left(\frac{-\varepsilon \Omega v_{01} v_{02}}{2c^2} \right) \sin \Omega \tau ; \quad (12)$$

$$\frac{\partial v_{2\omega_1}^{(2)}}{\partial x} = \frac{\varepsilon \omega_1}{2c^2} v_{01}^2 \sin^2 \omega_1 \tau . \quad (13)$$

Розв'язки рівнянь (12) та (13):

$$v_{\Omega}^{(2)} = \left(\frac{-\varepsilon \Omega v_{01} v_{02}}{2c^2} \right) x \sin \Omega \tau ; \quad (14)$$

$$v_{2\omega_1}^{(2)} = \left(\frac{\varepsilon \omega_1 v_{01}^2}{2c^2} \right) x \sin 2\omega_1 \tau . \quad (15)$$

Знак мінус у виразі (14) враховує фазу коливань на частоті Ω .

Розв'язки (14) та (15) справедливі лише на відстанях x , що не перевищують величини відрізка [8]

$$L = \frac{c^2}{\varepsilon \Omega \sqrt{v_{01} v_{02}}} . \quad (16)$$

На відстані $x=L$ формується ударна хвиля та її профіль спотворюється, перетворюючись в пілкоподібну повільно згасаючу хвилю [8].

Як приклад розглянемо дію бігармонічного сигналу (1) у середовищі, для якого параметр $Re \gg 1$. Характеристики середовища (нафта) та бігармонічного сигналу такі: $\rho=800$ кг/м³; $c=500$ м/с; $b=0,02$ Па·с; $\varepsilon=4,2$; $v_{01}=v_{02}=0,5$ м/с; $\omega_1=31$ кГц; $\omega_2=30$ кГц; $\Omega=1$ кГц; $Re=333$.

За таких параметрів генерується поле швидкостей, спектральні складові якого описуються залежностями, отриманими із (14) та (15):

$$v_{\Omega}^{(2)} = (-2,1 \cdot 10^{-3}) x \sin \Omega \tau = -A_{v_{\Omega}^{(2)}} \sin \Omega \tau, \quad (17)$$

$$v_{2\omega_1}^{(2)} = 6,51 \cdot 10^{-2} x \sin 2\omega_1 \tau = A_{v_{2\omega_1}^{(2)}} \sin 2\omega_1 \tau . \quad (18)$$

Розв'язок (17) із урахуванням залежності (16) справедливий в області $0 \leq x \leq L_{\Omega} = 119$ м, розв'язок (18) – в області $0 \leq x \leq L_{2\omega_1} = 3,84$ м.

На рис. 2 приведено графіки амплітуд швидкостей $A_{v_{\Omega}^{(2)}}$ і $A_{v_{2\omega_1}^{(2)}}$. Криву 2 (амплітуди $A_{v_{2\omega_1}^{(2)}}$) на рис. 2 зображено в напівлогарифмічній системі координат (по осі $0 - L_{\Omega}$ числові значення відкладені в десяткових логарифмах).

Порівнявши криві 1 і 2 рис. 2, можна зробити висновок, що амплітуда коливань на частоті $2\omega_1$ у нелінійно-

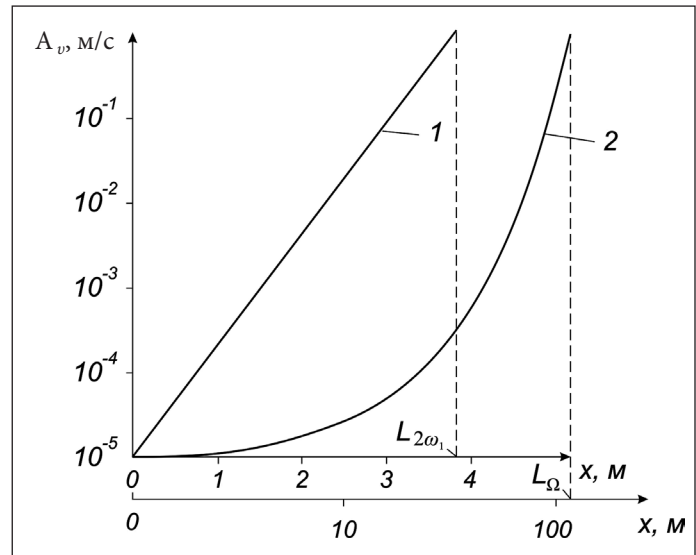


Рис. 2. Амплітуди коливань швидкості (нафта) на частотах $2\omega_1$ (1) і Ω (2) при $Re=333$

му середовищі вища, ніж на частоті Ω . Тобто при $Re \gg 1$ відбувається перерозподіл (перекачування) енергії спектральних складових коливальної швидкості в область більш високих частот.

Висновок

У процесі бігармонічної взаємодії акустичних хвиль формування згенерованого поля швидкостей значною мірою залежить від числа Рейнольдса Re . При $Re \ll 1$ акустична хвиля на частоті $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ у дисипативному середовищі згасає значно повільніше, ніж хвилі, що взаємодіють. Застосовуючи метод бігармонічної дії акустичних хвиль у технологіях інтенсифікації видобутку нафти і газу, енергію акустичної хвилі на частоті Ω можна передати в більш віддалені області нафтогазоносного пласта порівняно з основними частотами ω_1 і ω_2 . Це дає змогу збудити продуктивний пласт на більш далеких відстанях від джерела збурення, що супроводжується покращенням припливу флюїдів на вибій видобувних свердловин.

При $Re \gg 1$ характер формування акустичних полів швидкостей інший: інтенсивність хвиль на частотах $2\omega_1$ та $2\omega_2$ вища, ніж на частоті Ω , і відбувається перекачування енергії спектральних складових коливальної швидкості в область більш високих частот.

Зауважимо, що при числах Re , відмінних від граничних випадків $Re \ll 1$ і $Re \gg 1$, для рівняння Бюргера потрібно знаходити точні аналітичні розв'язки і на їх основі проводити аналіз акустичних полів під час бігармонічного оброблення вуглеводневих пластів.

Особливості трансформації акустичних полів у процесі бігармонічної акустичної дії на породи-колектори нафти і газу доцільно враховувати під час розробки нових перспективних технологій вилучення вуглеводнів із продуктивних пластів.

Список використаних джерел

1. Крутин В.Н. Механизм акустической интенсификации притоков нефти из продуктивных пластов / В.Н. Крутин // Каротажник. – 1998. – Вып. 42. – С. 46–53.
2. Горбачев Ю.И. Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений / Ю.И. Горбачев // НТВ: Каротажник. – 2000. – Вып. 60. – С. 55–67.
3. Орентлихерман Э. Технология акустической реабилитации скважин и пластов для решения задач повышения нефтеотдачи / Э. Орентлихерман, Д. Воронин, А. Исхаков, Ю. Горбачев // Нефть и газ. – 2002. – № 5. – С. 51–55.
4. Нагорний В.П. Технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк – К.: Ессе, 2013. – 268 с.
5. Нагорний В.П. Бигармонические волны в нелинейной среде / В.П. Нагорный, И.И. Денисюк, В.М. Лихван // Мат.-лы X Междунар. научн. конф. «Импульсные процессы в механике сплошных сред». – Николаев, 2013. – С. 179–182.
6. Нагорний В.П. Бігармонічна дія акустичних хвиль в нелінійному дисипативному геосередовищі / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк, В.М. Лихван, Я.О. Юшицина // Мат.-лы XXIII Междунар. научн. школы им. С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Алушта, 2013. – С. 220–224.
7. Гурбатов С.Н. Нелинейная акустика в задачах / С.Н. Гурбатов, О.В. Руденко. – М.: МГУ, 1990. – 80 с.
8. Руденко О.В. Теоретические основы нелинейной акустики / О.В. Руденко, С.И. Солуян. – М.: Наука, 1975. – 288 с.

Автори статті

Нагорний Володимир Петрович

Доктор технічних наук, професор, завідувач відділом Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Освіта за фахом – механік. Основний напрям діяльності, наукових досліджень – розробка нафтових та газових родовищ, трубопровідний транспорт, нафтогазосховища.

**Денисюк Іван Іванович**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Освіта за фахом – механік. Основний напрям діяльності, наукових досліджень – імпульсні методи підвищення дебіту видобувних свердловин.

**Юшицина Ярослава Олександрівна**

Молодший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Освіта за фахом – розробка нафтових і газових родовищ. Основний напрям діяльності, наукових досліджень – імпульсні методи підвищення дебіту видобувних свердловин.

**Лихван Вадим Максимович**

Головний геолог ГПУ «Полтавагазвидобування». Закінчив Харківський державний університет ім. М.Горького, спеціальність гідрогеологія. Коло наукових інтересів: геологія і розробка родовищ вуглеводнів, організація геологорозвідувальних робіт.



НОВИНИ

Бремен отримав кошти ЄС для спорудження терміналу ЗПГ

Відповідно до програми ЄС у морському порту Німеччини Бремен планується побудувати термінал ЗПГ. Прийняті європейські стандарти потребують зменшення викидів сірки морським транспортом у басейні Балтійського моря, чого можна досягнути, якщо використовувати більш екологічно чисте паливо, зокрема ЗПГ. Цей проект здійснюється згідно з програмою Теп-Т, метою якої є забезпечення спорудження заправних станцій ЗПГ в основних європейських портах для доступності ЗПГ як альтернативного палива. Особливостями проекту є спорудження гнучкого багатомодульного терміналу, який може забезпечувати ЗПГ дорожніх і залізничних приморських споживачів у радіусі 300–400 км. Він передбачає планування, проектні роботи, будівництво й експлуатацію заправної станції ЗПГ. Оскільки на початковому етапі обсяг заправок буде відносно малим, гнучкий проект забезпечить відповідне розширення на пізнішій стадії.

Проект буде реалізовано до кінця 2015 р.

За матеріалами сайту <http://www.lngworldnews.com/bremen-gets-eu-funding-for-lng-terminal/>