

СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХВИЛЬ, ЗБУДЖЕНИХ ФАЗОВО-МОДУЛЬОВАНИМ АКУСТИЧНИМ СИГНАЛОМ У НЕЛІНІЙНОМУ ГЕОФІЗИЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

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

*Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
пр. Паладіна, 32, Київ 03680, Україна, e-mail: vgv_nagorny@ukr.net*

Досліджено частоти та амплітуди коливань, що генеруються нелінійним геофізичним середовищем у процесі обробки його фазово-модульованим акустичним сигналом. Результати досліджень можуть бути використані під час акустичної обробки нафтовмісних порід з метою збільшення дебіту видобувних свердловин.

Ключові слова: амплітуда, геофізичне середовище, нелінійність, спектр, частота.

Вступ. Механізми фізико-хімічних процесів, що відбуваються за акустичної дії на пласт і пластовий флюїд, досить повно викладені в дослідженнях [3–5, 7]. У цих роботах відзначається факт інтенсифікації припливів під час обробки таких систем акустичною дією.

Широкий спектр частот акустичної імпульсної дії дає можливість впливати на всі або більшість структурних елементів системи пласт – пластовий флюїд з достатньою ефективністю. Велике значення з точки зору ефективної дії на пласт поряд з частотним спектром акустичних коливань має також їх достатня потужність.

З метою розширення спектральних характеристик акустичного впливу на геофізичне середовище застосовують різні технологічні методи, такі як бігармонічна дія акустичними хвилями [9], амплітудно- і частотно-модульовані акустичні збудження [1] та ін. Проте теоретичному обґрунтуванню зазначених методів приділено недостатньо уваги.

Постановка задачі. Дослідження спектральних характеристик фазово-модульованих акустичних хвиль за їх дії на нелінійне геофізичне середовище проведено на основі неоднорідного хвильового рівняння [9]

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

де $u(x, t)$ – зміщення часточок середовища; c – швидкість поширення звукових хвиль у середовищі; γ – показник адіабати Пуассона.

На вході нелінійного геосередовища ($x = 0$) діє акустичний фазово-модульований сигнал виду [2]:

$$u_{\text{ФМ}}(t) = u_0 \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega t), \quad (2)$$

де u_0 – початкова амплітуда фазово-модульованого сигналу; ω_0 – носійна частота; Ω – частота фазової модуляції; m – параметр модуляції.

Акустичну дію (2) представимо у вигляді

$$u_{\text{ФМ}}(t) = u_0 [\cos \omega_0 t \cdot \cos(m \sin \Omega t) - \sin \omega_0 t \cdot \sin(m \sin \Omega t)]. \quad (3)$$

Задача полягає в тому, щоб, проаналізувавши нелінійне рівняння (1) методом послідовних наближень, визначити, які частоти можуть виникати в разі поширення фазово-модульованого сигналу (3) в геофізичному середовищі з квадратичною і кубічною нелінійностями.

У виразі (3) функції $\cos(m \sin \Omega t)$ і $\sin(m \sin \Omega t)$ розкладемо в ряди Фур'є за функціями Бесселя І роду n -го порядку [6]

$$\begin{aligned} \cos(m \sin \Omega t) &= I_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n}(m) \cos 2n \Omega t; \\ \sin(m \sin \Omega t) &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n-1}(m) \sin(2n-1) \Omega t, \end{aligned} \quad (4)$$

де

$$I_n(m) = \left(\frac{m}{2} \right)^n 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{m}{2} \right)^{2k};$$

$\Gamma(n+k+1)$ – гамма-функція.

Підставивши вирази (4) у співвідношення (3), після нескладних тригонометричних перетворень одержимо розв'язок рівняння (1) в першому наближенні:

$$\begin{aligned} u_{\text{ФМ}}(t) &= u_0 \left[\cos \omega_0 t \left(I_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n}(m) \cos 2n \Omega t \right) - \right. \\ &\quad \left. - \sin \omega_0 t \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n-1}(m) \sin(2n-1) \Omega t \right] = \\ &= u_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m) \cos(\omega_0 + n \Omega) t. \end{aligned} \quad (5)$$

Зауважимо, що у виразі (5) враховано співвідношення для функцій Бесселя [6]

$$I_{-n}(m) = (-1)^n I_n(m).$$

Тому початкові фази бокових коливань з частотами $\omega_0 + n\Omega$ та $\omega_0 - n\Omega$ збігаються, коли n – парне число, і відрізняються на 180° , коли n – непарне.

Із виразу (5) видно, що спектр фазово-модульованого сигналу (2) в загальному випадку містить нескінченне число складових, частоти яких дорівнюють $\omega_0 \pm n\Omega$, а амплітуди цих складових пропорційні значенням $I_n(m)$.

Результати. Вважаючи нелінійні ефекти слабкими, у першому наближенні нехтуємо в рівнянні (1) правою частиною. При цьому одержуємо лінійне хвильове рівняння

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = 0,$$

розв'язок якого має вигляд

$$u_{\text{ФМ}}^{(1)}(x, \tau) = u_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m) \cos(\omega_0 + n\Omega)\tau,$$

де $\tau = t - x/c$.

Щоб знайти друге наближення $u_{\text{ФМ}}^{(2)}(x, \tau)$ розв'язку рівняння (1), в його праву частину слід підставити похідні функції:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{\text{ФМ}}^{(1)}}{\partial x} &= u_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m) \left(-\frac{\omega_0 + n\Omega}{c} \right) (-\sin(\omega_0 + n\Omega)\tau); \\ \frac{\partial^2 u_{\text{ФМ}}^{(1)}}{\partial x^2} &= u_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m) \left(-\frac{\omega_0 + n\Omega}{c} \right)^2 (-\cos(\omega_0 + n\Omega)\tau); \\ \left(\frac{\partial u_{\text{ФМ}}^{(1)}}{\partial x} \right)^2 &= u_0^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n^2(m) \left(\frac{\omega_0 + n\Omega}{c} \right)^2 \sin^2(\omega_0 + n\Omega)\tau. \end{aligned} \quad (6)$$

Підставивши співвідношення (6) в праву частину рівняння (1), знаходимо

$$\begin{aligned} F_{\text{ФМ}}(\omega, \tau) &= -(\gamma + 1) u_0^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n^2(m) \left(\frac{\omega_0 + n\Omega}{c} \right)^3 \times \\ &\quad \times \sin(\omega_0 + n\Omega)\tau \cdot \cos(\omega_0 + n\Omega)\tau + \\ &\quad + \frac{(\gamma + 1)(\gamma + 2)}{2} u_0^3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n^3(m) \left(\frac{\omega_0 + n\Omega}{c} \right)^4 \times \\ &\quad \times \sin^2(\omega_0 + n\Omega)\tau \cdot \cos(\omega_0 + n\Omega)\tau. \end{aligned} \quad (7)$$

Враховуючи, що

$$\sin(\omega_0 + n\Omega)\tau \cdot \cos(\omega_0 + n\Omega)\tau = \frac{1}{2} \sin 2(\omega_0 + n\Omega)\tau;$$

$$\begin{aligned} \sin^2(\omega_0 + n\Omega)\tau \cdot \cos(\omega_0 + n\Omega)\tau &= \\ = \frac{1}{4} [\cos(\omega_0 + n\Omega)\tau - \cos 3(\omega_0 + n\Omega)\tau], \end{aligned}$$

співвідношення (7) запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} F_{\text{ФМ}}(\omega, \tau) &= \\ &= \frac{-(\gamma + 1)}{2} u_0^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n^2(m) \left(\frac{\omega_0 + n\Omega}{c} \right)^3 \sin 2(\omega_0 + n\Omega)\tau + \\ &\quad + \frac{(\gamma + 1)(\gamma + 2)}{8} u_0^3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n^3(m) \left(\frac{\omega_0 + n\Omega}{c} \right)^4 \times \\ &\quad \times [\cos(\omega_0 + n\Omega)\tau - \cos 3(\omega_0 + n\Omega)\tau]. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким чином, залежність (8) відображує змушувальну силу $F_{\text{ФМ}}(\omega, \tau)$ що виникає під час дії фазово-модульованого сигналу на нелінійне геофізичне середовище (1), у вигляді спектрального розкладу в досить широкому частотному діапазоні.

З урахуванням залежності (8) в табл. 1 наведено спектральний склад функції $F_{\text{ФМ}}(\omega, \tau)$ при $m = 1$ для індексу n від 0 до ± 2 включно. Функція Бесселя $I_3(1)$ досить мала [6] і несуттєво впливає на амплітудні значення частотного спектра.

Розглянемо приклад: $u_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $\gamma = 7,5$; $m = 1$; $\omega_0 = 7,5$ кГц; $\Omega = 1,875$ кГц; $c = 4500$ м/с. З використанням формул, наведених у табл. 1, розраховано амплітуди спектральних складових (табл. 2.)

Як видно з даних табл. 2, амплітуди складових спектра малі, порядок їх становить 10^{-7} – 10^{-11} м. Крім того, на частотах 11,250; 15,000; 18,750; 22,500; 28,125 кГц коливання мають фазовий зсув на 180° .

Зауважимо, що за результатами натурних вимірів для відчутного впливу на нафтові поклади достатньо хвильового поля з амплітудою пружних коливань у межах 10^{-8} – 10^{-9} м $^{-1}$ [8]. Отже, хвильові дії таких амплітуд можуть слугувати спусковим механізмом вивільнення внутрішньої енергії в пласті, що виникає в разі взаємодії гармонічних хвиль з тріщинами в пласті і їх розкриттям, що супроводжується випромінюванням хвиль високої частоти [11]. Відомо також, що під час обробки нафт хвилями високої частоти знижується їх в'язкість, унаслідок чого збільшується рухливість нафт у каналах фільтрації пласта, а отже, і приплив нафти на вибір свердловини та її дебіт [10].

Висновки. За поширення фазово-модульованих збурень унаслідок нелінійних ефектів і взаємодії гармонічних коливань у геофізичному середовищі з квадратичною і кубічною нелінійностями збуджуються (генеруються) коливання з частотами ω_0 , $2\omega_0$, $3\omega_0$, $\omega_0 + \Omega$, $\omega_0 - \Omega$, $2(\omega_0 + \Omega)$, $2(\omega_0 - \Omega)$, $3(\omega_0 + \Omega)$, $3(\omega_0 - \Omega)$, $\omega_0 + 2\Omega$, $\omega_0 - 2\Omega$, $2(\omega_0 + 2\Omega)$, $2(\omega_0 - 2\Omega)$, $3(\omega_0 + 2\Omega)$, $3(\omega_0 - 2\Omega)$, що дає можливість обробляти нелінійні геофізичні середовища в досить широкому діапазоні частот. Отриманий результат може бути використаний при акустичній обробці нафтових покладів фазово-мо-

Таблиця 1. Спектральний склад і амплітуди спектральних складових за взаємодії фазово-модульованого сигналу з нелінійним геосередовищем при $m = 1$

Порядок функції Бесселя n	Частота	Амплітуда спектральних складових
0	ω_0	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_0^3(m) \left(\frac{\omega_0}{c}\right)^4$
0	$2\omega_0$	$-\frac{(\gamma+1)}{2} u_0^2 I_0^2(m) \left(\frac{\omega_0}{c}\right)^3$
0	$3\omega_0$	$-\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_0^3(m) \left(\frac{\omega_0}{c}\right)^4$
1	$\omega_0 + \Omega$	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_1^3(m) \left(\frac{\omega_0 + \Omega}{c}\right)^4$
-1	$\omega_0 - \Omega$	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_1^3(m) \left(\frac{\omega_0 - \Omega}{c}\right)^4$
1	$2(\omega_0 + \Omega)$	$-\frac{(\gamma+1)}{2} u_0^2 I_1^2(m) \left(\frac{\omega_0 + \Omega}{c}\right)^3$
-1	$2(\omega_0 - \Omega)$	$-\frac{(\gamma+1)}{2} u_0^2 I_1^2(m) \left(\frac{\omega_0 - \Omega}{c}\right)^3$
1	$3(\omega_0 + \Omega)$	$-\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_1^3(m) \left(\frac{\omega_0 + \Omega}{c}\right)^4$
-1	$3(\omega_0 - \Omega)$	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_1^3(m) \left(\frac{\omega_0 - \Omega}{c}\right)^4$
2	$\omega_0 + 2\Omega$	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_2^3(m) \left(\frac{\omega_0 + 2\Omega}{c}\right)^4$
-2	$\omega_0 - 2\Omega$	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_2^3(m) \left(\frac{\omega_0 - 2\Omega}{c}\right)^4$
2	$2(\omega_0 + 2\Omega)$	$-\frac{(\gamma+1)}{8} u_0^2 I_2^2(m) \left(\frac{\omega_0 + 2\Omega}{c}\right)^3$
-2	$2(\omega_0 - 2\Omega)$	$-\frac{(\gamma+1)}{8} u_0^2 I_2^2(m) \left(\frac{\omega_0 - 2\Omega}{c}\right)^3$
2	$3(\omega_0 + 2\Omega)$	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_2^3(m) \left(\frac{\omega_0 + 2\Omega}{c}\right)^4$
-2	$3(\omega_0 - 2\Omega)$	$\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 I_2^3(m) \left(\frac{\omega_0 - 2\Omega}{c}\right)^4$

Таблиця 2. Амплітуди спектральних складових за взаємодії фазово-модульованого сигналу з нелінійним геосередовищем

Частота, кГц	Амплітуда, 1/м
3,750	$5,920 \cdot 10^{-11}$
5,625	$1,680 \cdot 10^{-8}$
7,500	$2,464 \cdot 10^{-7}$
9,375	$1,296 \cdot 10^{-7}$
11,250	$-6,423 \cdot 10^{-6}$
15,000	$-4,604 \cdot 10^{-5}$
16,875	$1,680 \cdot 10^{-8}$
18,750	$-2,976 \cdot 10^{-5}$
22,500	$-1,157 \cdot 10^{-6}$
28,125	$-1,296 \cdot 10^{-7}$
33,750	$4,794 \cdot 10^{-9}$

дульованим сигналом з метою збільшення дебіту видобувних свердловин.

1. Александров В. Развитие опыта акустической обработки продуктивной зоны скважин / В. Александров, М. Бушер, Ю. Казаков, В. Майоров // Технологии ТЭК. — 2003. — № 2. — С. 1–9.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Высш. шк., 1988. — 448 с.
3. Горбачев Ю.И. Физико-химические основы ультразвуковой очистки призабойной зоны нефтяных скважин // Геоинформатика. — 1998. — № 3. — С. 7–12.
4. Горбачев Ю.И. Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений / Ю.И. Горбачев // НТВ: Каротажник. — Тверь: ГЕРС. — 2000. — Вып. 60. — С. 55–67.
5. Дыбленко В.П. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия / В.П. Дыбленко, Р.Н. Камалов, Р.Я. Шарифуллин, И.А. Туфанов. — М: Недра-Бизнесцентр, 2000. — 381 с.
6. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Недра, 1968. — 720 с.
7. Крутин В.Н. Механизм акустической интенсификации притоков нефти из продуктивных пластов / В.Н. Крутин // НТВ: Каротажник. — Тверь: ГЕРС. — 1998. — Вып. 42. — С. 46–53.
8. Курленя М.В. Определение области вибросейсмического воздействия на месторождение нефти с дневной поверхности / М.В. Курленя, С.В. Сердюков // ФТРПИ. — 1999. — № 4. — С. 4–11.
9. Нагорный В.П. Імпульсні методи інтенсифікації видобутку вуглеводнів / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк. — К.: Ессе, 2012. — 323 с.
10. Нагорный В.П. Исследование повышения эффективности пузырькового режима течения флюидов / В.П. Нагорный, И.И. Денисюк, В.М. Лихван, Т.А. Швейкина // Нефт. хоз-во. — 2013. — № 5. — С. 80–82.
11. Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. — М.: Наука, 1990. — 240 с.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ФАЗОВО-МОДУЛИРОВАННЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СИГНАЛОМ В НЕЛИНЕЙНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

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

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, пр. Палладина, 32, Киев 03680, Украина, e-mail: vgv_nagorniy@ukr.net

Исследованы частоты и амплитуды колебаний, генерируемые нелинейной геофизической средой в процессе обработки ее фазово-модулируемым акустическим сигналом. Результаты исследований могут быть использованы при обработке нефтесодержащих пород с целью увеличения дебита добывающих скважин.

Ключевые слова: амплитуда, геофизическая среда, нелинейность, спектр, частота.

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PHASE-MODULATED ACOUSTIC WAVES GENERATED BY ACOUSTIC SIGNAL IN NONLINEAR GEOPHYSICAL MEDIUM

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

Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, ave Palladin, 32, Kyiv 03680, Ukraine, e-mail: vgv_nagorniy@ukr.net

It is known from practical experience that wide frequency spectrum of acoustic impulse action makes possible to affect with reasonable effectiveness most structural elements in the layer-fluid system. Different technological methods are used in order to expand spectral characteristics of acoustic impact on geophysical medium of the layer. Among them: biharmonic impact by acoustic waves, amplitude- and phase-modulated acoustic disturbances, etc. However, insufficient attention has been paid to theoretical justification of the methods. The studies of spectral characteristics of phase-modulated acoustic waves during their impact on non-linear geophysical medium were conducted on the basis of heterogeneous wave equation. A method of successive approximations has been used. It has been found that as a result of non-linear effects and interaction of harmonic vibrations in geophysical medium with square and cubic nonlinearities, a wide spectrum of vibrations with amplitudes within the limits of 10^{-5} – 10^{-9} m⁻¹ is generated. Wave actions with such amplitudes may serve as a trigger for release of interior energy generated during the process of interaction of harmonic waves with fissures within the medium of a layer. This leads to opening of fissures accompanied by emission of high-frequency waves. In case of high-frequency waves interacting with the fluid layer; its viscosity decreases. At this point, mobility of fluid in filtration channels of the layer and its supply to the well bottom increase. The results of the studies can be used during acoustic processing of oil-bearing rocks to increase the rate of yield of oil and gas wells.

Keywords: amplitude, geophysical medium, nonlinearity, spectrum, frequency.

References:

1. Aleksandrov V., Busher M., Kazakov Ju., Majorov V. *Razvitie opyta akusticheskoy obrabotki produktivnoy zony skvazhin* [The development of experience of wells productive zone]. *Tehnologii TEK* [Technologies FEC], 2003, no. 2, pp. 1-9.
2. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radiotechnical chains and signals]. Moscow, *Vysshaya shkola*, 1988, 448 p.
3. Gorbachev Yu.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy ul'trazvukovoy ochestki prizaboynoy zony neftyanykh skvazhin* [Physico-chemical basis of ultrasonic cleaning bottomhole oil zone]. *Geoinformatika* [Geoinformatics (Russia)], 1998, no. 3, pp. 7-12.
4. Gorbachev Ju.I. *Akusticheskoe vozdejstvie i povyshenie rentabel'nosti razrabotki neftyanykh mestorozhdenij* [Sound effects and increase the profitability of oil field development]. *NTV: Karotazhnik* [STB: Logger], Tver, *GERS*, 2000, no. 60, pp. 55-67.
5. Dyblenko V.P., Kamalov R.N., Sharifullin R.Ja., Tufanov I.A. *Povyshenie produktivnosti i reanimacija skvazhin s primeneniem vibrovolnovogo vozdejstvija* [Productivity increasing and reanimation of wells using vibro-wave action]. Moscow, *Nedra-Biznescentr*, 2000, 381 p.
6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics]. Moscow, *Nedra*, 1968, 720 p.
7. Krutin V.N. *Mehanizm akusticheskoy intensifikacii pritokov nefti iz produktivnykh plastov* [The mechanism of acoustic stimulation of oil from the reservoir]. *NTV: Karotazhnik* [STB: Logger], Tver, *GERS*, 1998, no. 42, pp. 46-53.
8. Kurlenja M.V., Serdjukov S.V. *Opredelenie oblasti vibroseismicheskogo vozdejstvija na mestorozhdenie nefti s dnevnoj poverhnosti* [Defining the scope vibroseismic impact on oil field from the surface]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, Rossija, Novosibirsk, 1999, no. 4, pp. 4-11.
9. Nagornyy V.P., Denysjuk I.I. *Impul'sni metody intensyfikacii 'vydobutku vuglevodniv* [Pulse methods of intensifying production of hydrocarbons]. Kyiv, *Esse*, 2012, 323 p.
10. Nagornyy V.P., Denisyuk I.I., Likhvan V.M., Shveykina T.A. *Issledovanie povysheniya effektivnosti puzyr'kovogo rezhima techeniya flyuidov* [Research of improve the efficiency of bubble flow regime of fluid]. *Neftyanoe khozyaystvo* [Oil industry], 2013, no. 5, pp. 80-82.
11. Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya: ot teorii k praktike* [Fracture mechanics: from theory to practice]. Moscow, *Nauka*, 1990, 240 p.

Поступила в редакцию 11.11.2013 г.

Received 11/11/2013