

СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІГАРМОНІЧНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ПІД ЧАС ЇХ ДІЇ НА НЕЛІНІЙНЕ ГЕОФІЗИЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ

В.П. Нагорний, І.І. Денисюк

Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
вул. Б. Хмельницького, 63г, Київ 01054, Україна, e-mail: vgv_nagornyi@ukr.net

Для підвищення нафтогазовіддачі пластів застосовують акустичні методи дії на їх геофізичне середовище. З метою розширення можливостей акустичного впливу на нафтогазоносні пласти досліджено спектральні характеристики бігармонічної акустичної дії на пласт. Використано рівняння нелінійної акустики, які методом змінного профілю зведено до рівняння простих хвиль. На основі розв'язку рівняння простих хвиль для збурення довільної форми досліджено спектральні характеристики бігармонічного сигналу $v = \sin 2\omega t + m \sin(\omega t + \varphi)$, який поширюється в нелінійному геосередовищі при $m \ll 1$. Установлено, що процес взаємодії потужного сигналу з частотою 2ω і слабкішого сигналу з частотою ω чутливий до зсуву фази φ . За взаємодії слабого сигналу з частотою ω , зсунутого за фазою φ , з інтенсивною хвилею накачування частоти 2ω виникає нелінійний ефект параметричного підсилення слабого сигналу. Виявлено, що підсилення амплітуди слабого сигналу спостерігається під час зсуву за фазою в діапазоні $\varphi = 45^\circ \div 135^\circ$, найбільше підсилення – при куті зсуву фази $\varphi = 90^\circ$. В інших випадках амплітуда слабого сигналу зменшується. Отриманий результат може бути використаний при розробці перспективних хвильових методів обробки структурованих нафтогазоносних пластів, в яких розширення ділянки обробки пов'язується з підсиленням амплітуди акустичної хвилі резонансної частоти в разі використання енергії більш високочастотної інтенсивної хвилі накачування.

Ключові слова: амплітуда, акустика, геофізичне середовище, накачування, нелінійність, пласт, спектр, частота.

Вступ. З літературних джерел [4, 5, 8, 9, 12] відомо, що для підвищення нафтогазовіддачі пластів застосовують акустичні методи дії. З метою розширення можливостей цих методів використовують бігармонічну дію акустичними хвилями [10], амплітудно- і фазово-модульовані акустичні збурення [11, 12] та інші методи. Це дає змогу розширити спектральні характеристики акустичного впливу на структуроване нелінійне геофізичне середовище (геосередовище) [7]. Проте теоретичному обґрунтуванню зазначених методів приділено недостатньо уваги.

В роботі [10] на основі неоднорідного хвильового рівняння, яке виведено з основних рівнянь нелінійної акустики у змінних Лагранжа x, t , визначено та досліджено спектральні характеристики за дії гармонічної акустичної хвилі в нелінійному геосередовищі. Відомо, що рівняння нелінійної акустики одержані за умови $\left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \ll 1$ (де u – зміщення часточок середовища), коли розглядають слабонелінійні хвилі [6]. За цієї умови систему рівнянь нелінійної акустики можна звести до неоднорідного хвильового рівняння [6, 10]

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

де c – швидкість поширення акустичних хвиль у середовищі; γ – показник адиабати Пуассона, що входить до рівняння стану геосередовища.

Постановка задачі. В роботі [10] на основі рівняння (1) визначено й досліджено спектральні характеристики акустичного гармонічного сигналу $u = u_0 \sin \omega t$. Як свідчать дослідження, спектральні характеристики цієї дії на геосередовище переважно визначають правою частиною рівняння (1) через функцію

$$F(\omega, \tau) = a_1 \sin \omega \tau + a_2 \sin 2\omega \tau + a_3 \sin 3\omega \tau,$$

де

$$a_1 = \frac{1}{8} (\gamma + 1)(\gamma + 2) u_0^3 \left(\frac{\omega}{c} \right)^4; \quad a_2 = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right) u_0^2 \left(\frac{\omega}{c} \right)^3;$$

$\tau = t - x/c$ – часовий параметр. Ця функція має фізичний зміст змушувальної сили, яка збуджує в геосередовищі нові акустичні хвилі внаслідок нелінійних ефектів [3]. Для знаходження виду цих хвиль і їх спектральних характеристик необхідно розв'язати неоднорідне хвильове рівняння (1). Розв'язки цього рівняння для гармонічного акустичного сигналу наведено в роботі [10], їх знаходження навіть для гармонічних хвиль пов'язане із громіздкістю математичних викладок. Застосування методу повільного змінного профілю дає змогу спростити рівняння (1) і звести його до рівняння простих хвиль [6]

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\varepsilon}{c^2} v \frac{\partial v}{\partial \tau}, \quad (2)$$

де v – коливальна швидкість частинок середовища; $\varepsilon = \frac{(\gamma+1)}{2}$ – параметр акустичної нелінійності.

Рівняння (2) – рівняння першого порядку, а не другого, як вихідне рівняння (1), і розв'язувати його простіше.

Таким чином, задачу визначення спектральних характеристик вдається суттєво спростити. Спочатку потрібно знайти розв'язок рівняння простих хвиль (2) за дії збурення довільної форми

$$v(x=0, t) = v_0 \Phi(\omega t) \quad (3)$$

на межі нелінійного геосередовища, а потім визначити спектральні характеристики цього розв'язку, де $\Phi(\omega, t)$ – довільна періодична функція зі своїм аргументом з періодом $T = 2\pi$.

Результати. Скористаємося результатами праці [3], де для збурення (3) отриманий загальний розв'язок у вигляді неявної функції

$$v(x, \tau) = v_0 \Phi\left(\omega\tau + z \frac{v}{v_0}\right), \quad (4)$$

де $z = \frac{\varepsilon\omega}{c^2} v_0 x$ – безрозмірна відстань.

Для знаходження спектра розв'язок (4) необхідно розкласти в ряд Фур'є і знайти коефіцієнти розкладу c_n :

$$\frac{v}{v_0} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n(z) \exp(in\omega\tau).$$

Коефіцієнти розкладу c_n визначаємо за формулою [1]

$$c_n(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi\left(\omega\tau + z \frac{v}{v_0}\right) \exp(-in\omega\tau) d(\omega\tau), \quad (5)$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Проінтегрувавши вираз (5) декілька раз за частинами, знаходимо [7]

$$c_n(z) = \frac{-i}{2\pi n z} \int_{-\pi}^{\pi} (e^{-in\Phi(\xi)} - 1) e^{-in\xi} d\xi, \quad (6)$$

де $\xi = \omega\tau + z \frac{v}{v_0}$ – нова змінна.

Залежність (6) визначає спектр простої хвилі у нелінійному геофізичному середовищі за дії в ньому хвилі (3).

На основі одержаної залежності (6) дослідимо дію висхідного бігармонічного сигналу

$$\frac{v}{v_0} = \sin 2\omega t + m \sin(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

у нелінійному геосередовищі, де параметр $m \ll 1$; φ – зсув фази між інтенсивною хвилею на частоті 2ω та слабкого сигналу на частоті ω .

Процес взаємодії сигналів (7) має назву породженого: він чутливий до зсуву фази φ [6].

Визначимо, за якого зсуву фаз φ слабкий сигнал підсилюється, а за якого зменшується. Для розв'язання задачі скористаємося точним спектральним представленням розв'язку рівняння простих хвиль (6), в якому за функцію $\Phi(\xi)$ приймаємо співвідношення

$$\Phi(\xi) = \sin 2\xi + m \sin(\xi + \varphi). \quad (8)$$

Після підстановки співвідношення (8) в залежність (6) одержуємо

$$c_n(z, \varphi) = \left(\frac{-i}{2\pi n z}\right) \int_{-\pi}^{\pi} [e^{iz[\sin 2\xi + m \sin(\xi + \varphi)]} - 1] e^{-in\xi} d\xi. \quad (9)$$

Для дослідження амплітудних характеристик слабкого сигналу, що поширюється на частоті ω , розглянемо Фур'є-компоненту при $n = 1$.

Із виразу (9) при $n = 1$ отримуємо

$$\begin{aligned} c_1(z, \varphi) &= \left(\frac{-i}{2\pi z}\right) \int_{-\pi}^{\pi} [e^{iz[\sin 2\xi + m \sin(\xi + \varphi)]} - 1] e^{-i\xi} d\xi = \\ &= \left(-\frac{i}{2\pi z}\right) \int_{-\pi}^{\pi} [e^{iz \sin 2\xi} \cdot e^{imz \sin(\xi + \varphi)} - 1] e^{-i\xi} d\xi. \end{aligned}$$

При $m \ll 1$ маємо співвідношення

$$e^{imz \sin(\xi + \varphi)} \approx 1 + imz \sin(\xi + \varphi). \quad (10)$$

З урахуванням виразу (10) Фур'є-компонента $c_1(z)$ має вигляд

$$\begin{aligned} c_1(z, \varphi) &= \left(\frac{-i}{2\pi z}\right) \left\{ \int_{-\pi}^{\pi} [e^{iz \sin 2\xi} \cdot e^{-i\xi} + imz \sin(\xi + \varphi) \times \right. \\ &\quad \left. \times e^{iz \sin 2\xi} \cdot e^{-i\xi}] d\xi - \int_{-\pi}^{\pi} e^{-i\xi} d\xi \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Представивши функцію $\sin(\xi + \varphi)$ через показникову функцію комплексного аргумента та врахувавши тотожність для бesselевих функцій $\exp iz \sin \xi = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(z) \exp ik\xi$ [2], із залежності (11)

отримаємо

$$c_1(z, \varphi) = \left(-\frac{i}{z}\right) J_{1/2}(z) + \left(\frac{im}{2}\right) (e^{-i\varphi} J_1(z) - e^{i\varphi} J_0(z)). \quad (12)$$

Представивши у виразі (12) показникові функції $e^{-i\varphi}$, $e^{i\varphi}$ через тригонометричні функції $\sin \varphi$ і $\cos \varphi$, запишемо

Амплітуда коливань $|c_1(z, \varphi)|$ слабого сигналу частоти ω залежно від безрозмірної відстані z за різних кутів зсуву фаз φ ($m = 0,01$)

z	Кут зсуву фаз					
	0°; 180°	30°; 150°	45°; 135°	60°; 120°	80°; 100°	90°
0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
0,2	4,45	4,72	4,97	5,22	5,42	5,45
0,3	4,15	4,56	4,94	5,30	5,59	5,63
0,4	3,82	4,39	4,90	5,36	5,73	5,78
0,5	3,48	4,22	4,85	5,40	5,84	5,90
0,6	3,13	4,04	4,78	5,42	5,93	5,99
0,8	2,39	3,67	4,62	5,40	5,99	6,08
1,0	1,63	3,33	4,41	5,28	5,94	6,03

$$c_1(z, \varphi) = \frac{m}{2} [J_0(z) + J_1(z)] \sin \varphi - i \left(\frac{m}{2} \right) [J_0(z) - J_1(z)] \cos \varphi - \frac{i J_{1/2}(z)}{z} \quad (13)$$

Оскільки член $i J_{1/2}(z)/z$ у виразі (13) не залежить від параметра φ , цей вираз матиме вигляд

$$c_1(z, \varphi) = \frac{m}{2} [J_0(z) + J_1(z)] \sin \varphi - i \frac{m}{2} [J_0(z) - J_1(z)] \cos \varphi$$

Отже, амплітуда слабого сигналу на частоті ω залежно від кута φ дорівнюватиме

$$|c_1(z, \varphi)| = \frac{m}{2} \times \sqrt{[J_0(z) + J_1(z)]^2 \sin^2 \varphi + [J_0(z) - J_1(z)]^2 \cos^2 \varphi} \quad (14)$$

Після нескладних перетворень одержимо

$$|c_1(z, \varphi)| = \frac{m}{2} \sqrt{J_0^2(z) + J_1^2(z) - 2J_0(z)J_1(z)\cos 2\varphi} \quad (15)$$

Очевидно, що амплітуда $|c_1(z, \varphi)|$ слабого сигналу залежить від трьох параметрів: m , z і φ . Від параметра m ця залежність є лінійною, за умовою задачі $m \ll 1$. Під час досліджень цей параметр зафіксовано. З практичної точки зору найбільший інтерес становлять дослідження залежності $|c_1(z, \varphi)|$ від параметрів z і φ .

У таблиці наведено результати розрахунків за формулою (15).

З метою виявлення закономірностей формування спектральних характеристик слабого сигналу та інтерпретації результатів розрахунків дані таблиці представлено графічно (рис. 1–4).

Сімейство кривих $|c_1(z, \varphi)|$ при деяких значеннях кута φ пов'язане з безрозмірною відстанню z , що змінюється в інтервалі від 0 до 1 – до моменту утворення розриву фронту акустичної хвилі (рис. 1). На рис. 2 в полярних координатах

зображено діаграми розподілу нормованої амплітуди коливань $|c_1(z, \varphi)|$ залежно від кута φ , на рис. 3 в декартових координатах показано залежності $|c_1(z, \varphi)|$ від кута φ за різних відстаней z .

Установлено, що за зміни кута зсуву фаз φ від 0° до 180° амплітуда $|c_1(z, \varphi)|$ слабого сигналу підсилюється в діапазоні $45^\circ < \varphi < 135^\circ$, а в діапазонах $0^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$, $135^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$ послаблюється (рис. 2, а, 3), причому найбільше його зниження відбувається при $\varphi = 0^\circ$ і $\varphi = 180^\circ$. Найефективніше сигнал підсилюється при $\varphi = 90^\circ$. За подальшої зміни кута φ від 180° до 360° маємо симетричну діаграму відносно осі 0° – 180° . Це пов'язане з тим, що залежність (15) має парну функцію $\cos 2\varphi$.

Порівнявши діаграми розподілу амплітуд коливань $|c_1(z, \varphi)|$ на відстанях $z = 0,6$ (див. рис. 2, а) і $z = 1,0$ (рис. 2, б), можна зробити висновок про зменшення інтенсивності коливань слабого сигналу на відстані $z = 1,0$ в діапазонах зміни кута φ : $0^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$, $120^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$; $0^\circ \leq \varphi \leq 300^\circ$; $180^\circ \leq \varphi \leq 240^\circ$. За зміни кута $60^\circ \leq \varphi \leq 120^\circ$ та $240^\circ \leq \varphi \leq 300^\circ$ інтенсивність хвилі на частоті ω для відстаней $z = 0,6$ і $z = 1,0$ практично однакова.

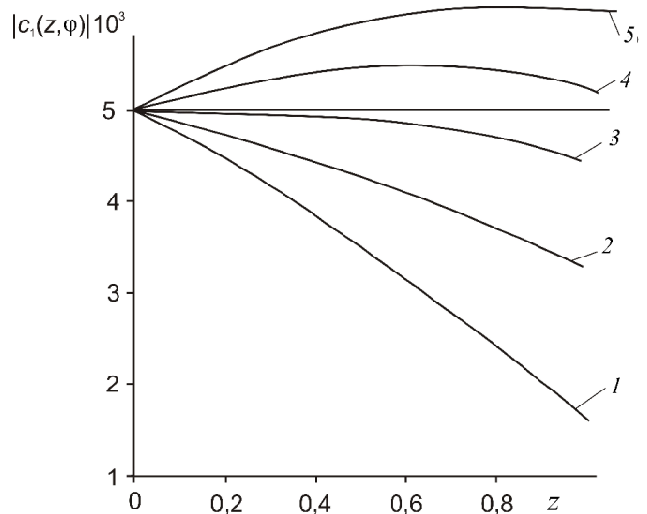


Рис. 1. Залежність нормованої амплітуди $|c_1(z, \varphi)|$ (до амплітуди v_0) слабого сигналу від відстані при різних значеннях кута зсуву фаз φ : 1 – 0° ; 2 – 30° ; 3 – 45° ; 4 – 60° ; 5 – 90°

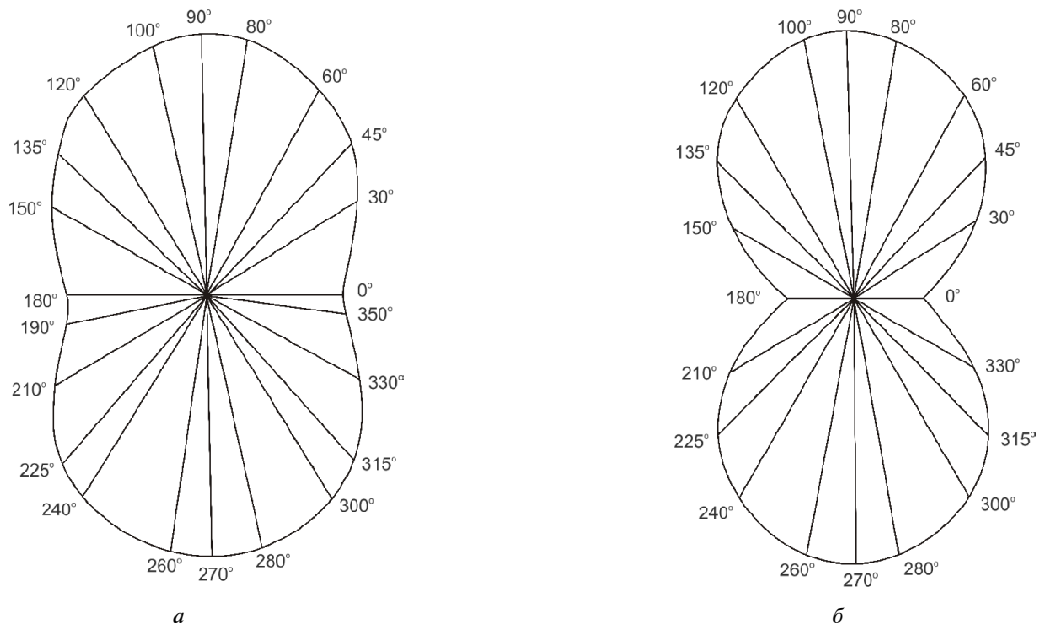


Рис. 2. Діаграми розподілу нормованої амплітуди коливань $|c_1(z, \varphi)|$ слабкого сигналу залежно від кута φ на відстанях: $a - z = 0,6$; $b - z = 1,0$

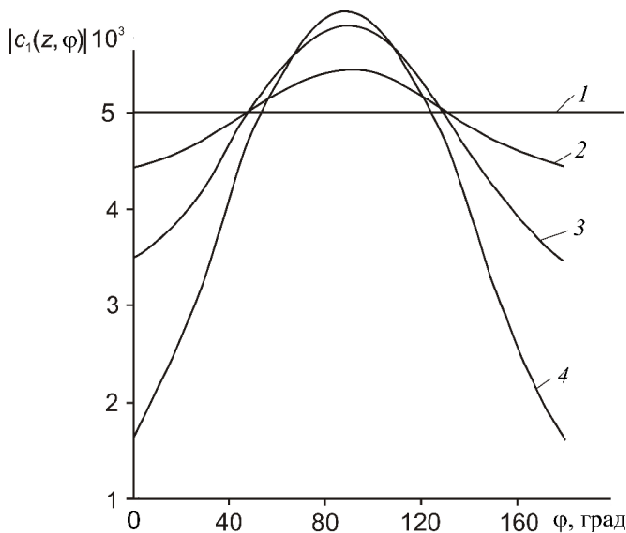


Рис. 3. Залежність нормованої амплітуди $|c_1(z, \varphi)|$ слабкого сигналу від кута зсуву фаз φ за різних значень безрозмірної відстані z : 1 - 0; 2 - 0,2; 3 - 0,5; 4 - 1,0

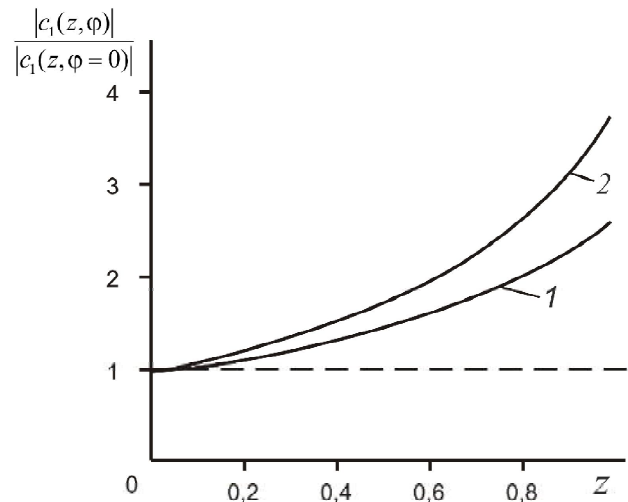


Рис. 4. Залежності коефіцієнтів підсилення $\frac{|c_1(z, \varphi)|}{|c_1(z, \varphi=0)|}$ від безрозмірної відстані z : 1 - $\varphi = 45^\circ$; 2 - $\varphi = 90^\circ$

Коефіцієнт підсилення $\frac{|c_1(z, \varphi)|}{|c_1(z, \varphi=0^\circ)|}$ слабкого

сигналу залежить від безрозмірної відстані z (рис. 4). Найбільше підсилення слабкого сигналу спостерігається при куті зсуву фаз $\varphi = 90^\circ$, при цьому коефіцієнт підсилення для $z = 1,0$ досягає значення 3,7.

Висновки. На основі загального розв'язку рівняння простих хвиль досліджено підсилення слабких сигналів у полі інтенсивної хвилі накачування. Встановлено, що за взаємодії слабкого сигналу, зсунутого за фазою φ , із інтенсивною хвилею накачування виникає нелінійний ефект підсилення цього сигналу. Виявлено, що за зміни кута φ від 0° до 180° ефективно підсилення амплі-

туди слабкого сигналу спостерігається під час зсуву за фазою в діапазоні $\varphi = 45^\circ \div 135^\circ$. При $\varphi = 0^\circ \div 45^\circ, 135^\circ \div 180^\circ$ амплітуда слабкого сигналу знижується, причому найбільше при $\varphi = 0^\circ$ і $\varphi = 180^\circ$. Найбільше підсилення зафіксовано при куті зсуву фази $\varphi = 90^\circ$. На відстані $z = 1$ воно досягає значення 3,7.

Отриманий результат може бути використаний під час розробки перспективних акустичних методів обробки нафтогазоносних пластів, особливо якщо розширення ділянки акустичної обробки пластів пов'язане з підсиленням амплітуди акустичної хвилі певної (резонансної) частоти за використання енергії більш високочастотної інтенсивної хвилі накачування.

1. Араманович И.Г. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости / И.Г. Араманович, Г.Л. Лунц, Л.Э. Эльсгольц. — М.: Наука, 1965. — 390 с.
2. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. — М.: Наука, 1979. — 830 с.
3. Грінченко В.Т. Основы акустики / В.Т. Грінченко, І.В. Вовк, В.Т. Мацапура. — К.: Наук. думка, 2007. — 640 с.
4. Горбачев Ю.И. Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений / Ю.И. Горбачев // НТВ “Каротажник”. — Тверь: Изд. АИС, 2000. — Вып. 60. — С. 55–67.
5. Горбачев Ю.И. Физико-химические основы ультразвуковой очистки призабойной зоны нефтяных скважин / Ю.И. Горбачев // Геоинформатика. — 1998. — № 3. — С. 7–12.
6. Гурбатов С.Н. Нелинейная акустика в задачах / С.Н. Гурбатов, О.В. Руденко — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 80 с.
7. Денисюк І.І. Спектральні характеристики хвиль при акустичній дії на нелінійне геофізичне середовище / І.І. Денисюк, В.П. Нагорний. — К.: Ін-т геофізики НАН України, 2014. — 30 с.
8. 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.
9. Крутин В.Н. Механизм акустической интенсификации притоков нефти из продуктивных пластов / В.Н. Крутин // НТВ “Каротажник”. — Тверь: Изд. АИС, 1998. — Вып. 42. — С. 46–53.
10. Нагорний В.П. Імпульсні методи інтенсифікації видобутку вуглеводнів / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк. — К.: Ессе, 2012. — 323 с.
11. Нагорний В.П. Спектральні характеристики хвиль, збуджених фазово-модульованим акустичним сигналом в нелінійному геофізичному середовищі / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк, Я.О. Юшичина // Геоінформатика. — 2014. — № 2 (50). — С. 59–65.
12. Развитие опыта акустической обработки продуктивной зоны скважин / В. Александров, М. Бушер, Ю. Казаков, В. Майоров // Технологии ТЭК. — 2003. — № 2. — С. 1–9.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИГАРМОНИЧЕСКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ИХ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЛИНЕЙНУЮ ГЕОФИЗИЧЕСКУЮ СРЕДУ

В.П. Нагорный, И.И. Денисюк

Отделение геодинамики взрыва Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, ул. Б. Хмельницкого, 63г, Киев 01054, Украина, e-mail: vgv_nagorny@ukr.net

Для повышения нефтегазоотдачи пластов применяются акустические методы воздействия на геофизическую среду. С целью расширения возможностей акустического воздействия на нефтегазоносные пласты исследованы спектральные характеристики бигармонического акустического воздействия на пласт. Используются уравнения нелинейной акустики, сводимые методом переменного профиля к уравнению простых волн. На основе решения уравнения простых волн для возмущения произвольной формы исследованы спектральные характеристики бигармонического сигнала $v = \sin 2\omega t + m \sin(\omega t + \varphi)$, распространяющегося в нелинейной геофизической среде при $m \ll 1$. Установлено, что процесс взаимодействия мощного сигнала с частотой 2ω и более слабого сигнала с частотой ω чувствителен к смещению фазы φ . При взаимодействии слабого сигнала с частотой ω , смещенного по фазе φ , с интенсивной волной накачки частоты 2ω возникает нелинейный эффект параметрического усиления слабого сигнала. Усиление амплитуды слабого сигнала наблюдается при сдвиге по фазе в диапазоне $\varphi = 45^\circ \div 135^\circ$, максимальное — при сдвиге по фазе $\varphi = 90^\circ$. В других диапазонах сдвига φ амплитуда слабого сигнала уменьшается. Полученный результат может быть использован при разработке перспективных волновых методов обработки структурированных нефтегазоносных пластов, в которых расширение области обработки связывается с усилением амплитуды акустической волны резонансной частоты путем использования энергии более высокочастотной интенсивной волны накачки.

Ключевые слова: амплитуда, акустика, геофизическая среда, накачка, нелинейность, пласт, спектр, частота.

SPECTRAL BEHAVIOR OF BIHARMONIC ACOUSTIC WAVES DURING THEIR ACTION ON NONLINEAR GEOPHYSICAL MEDIUM

V.P. Nagorny, I.I. Denysyuk

Department of Explosion Geodynamics of Institute of Geophysics National Academy of Sciences of Ukraine, 63g B. Khmelnytsky Str., Kyiv 01054, Ukraine, e-mail: vgv_nagorny@ukr.net

Purpose. Acoustic methods are used for acting on geological medium in order to increase oil and gas reservoir recovery. To enlarge possibilities of acoustic effect on hydrocarbon layers the authors have studied spectral characteristics of biharmonic acoustic effect on a layer.

Design/methodology/approach. Equations of non-linear acoustics were applied in this process, which can be reduced to equations of simple waves with the help of an alternating profile method.

Findings. Based on solving the equation of simple waves for disturbance of arbitrary shape, we studied spectral characteristics of biharmonic signal $v = \sin 2\omega t + m \sin(\omega t + \varphi)$ which propagates in nonlinear geo-medium with $m \ll 1$. We have found that the process of interaction of a strong signal with frequency 2ω and a weaker signal with frequency ω is sensitive to the shift of the phase φ . In case of interaction of a weak signal with frequency ω , shifted by phase φ , with intense wave of pumping with frequency 2ω , there appears a nonlinear effect of parametric amplification of a weak signal. We have revealed that amplification of the weak signal pulse height is observed in the case of the shift of the phase in the range of $\varphi = 45^\circ \dots 135^\circ$. The biggest amplification is observed when the angle of the shift of the phase $\varphi = 90^\circ$ and reaches 3,7. When $\varphi = 0^\circ \dots 45^\circ; 135^\circ \dots 180^\circ$ the amplitude of a weak signal decreases.

Practical value/implications. The results obtained can be used for developing promising wave methods of structured hydrocarbon-bearing layers processing, where the proposed widening of acoustic processing range is connected with the enhancement of the amplitude of resonance frequency wave by applying the energy of an intensive injection wave with higher frequency.

Keywords: amplitude, acoustics, geophysical medium, pumping, nonlinearity, layer, spectrum, frequency.

References:

1. Aramanovich I.G, Lunts G.L., El'sgol'ts L.E. *Funktsii kompleksnogo peremennogo. Operatsionnoe ischislenie. Teoriya ustoychivosti* [Function of combined variable. Operation calculus. Theory of stability]. Moscow, Nauka, 1965, 390 p.
2. Abramovits M., Stigan I. (Eds). *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam* [Manual of special functions]. Moscow, Nauka, 1979, 830 p.
3. Grinchenko V.T, Vovk I.V., Matsapura V.T. *Osnovy akustiky* [Theory of acoustics]. Kyiv, Naukova dumka, 2007, 640 p.
4. Gorbachev Ju.I. *Akusticheskoe vozdejstvie i povyshenie rentabel'nosti razrabotki nefjanyh mestorozhdenij* [Sound effects and increase the profitability of oil field development]. NTV "Karotazhnik". Tverj, Izd. AIS, 2000, no. 60, pp. 55-67.
5. Gorbachev Yu.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy ul'trazvukovoy oчитki prizaboynoy zony nefjanykh skvazhin* [Physico-chemical basis of ultrasonic cleaning bottomhole oil zone]. *Geoinformatika*, 1998, no. 3, pp. 7-12.
6. Gurbatov S.N., Rudenko O.V. *Nelineynaya akustika v zadachakh* [Nonlinear acoustic in problems]. Moscow, MSU Press, 1990, 80 p.
7. Denysyuk I.I., Nahornyy V.P. *Spektral'ni kharakterystyky khvyl' pry akustychniy diyi na neliniyne heofizychnye seredovyshche* [Spectral behavior of waves during their acoustic influence on nonlinear geophysical medium]. Kyiv, Institute of Geophysics National Academy of Sciences of Ukraine, 2014, 30 p.
8. Dyblenko V.P., Kamalov R.N., Sharifullin R.Ya., Tufanov I.A. *Povyshenie produktivnosti i reanimatsiya skvazhin s primeneniem vibrovolnovogo vozdeystviya* [Growth of productivity and revival of wells applying vibration wave action]. Moscow, Interior-Business center, 2000, 381 p.
9. Krutin V.N. *Mehanizm akusticheskoy intensifikacii pritokov nefi iz produktivnykh plastov* [The mechanism of acoustic stimulation of oil from the reservoir]. NTV "Karotazhnik". Tverj, Izd. AIS, 1998, no. 42, pp. 46-53.
10. Nagornyy V.P., Denysyuk I.I. *Impul'sni metody intensyfikacii' vydobutku vuglevodniv* [Pulse methods of intensifying production of hydrocarbons]. Kyiv, Esse, 2012, 323 p.
11. Nahornyy V.P., Denysyuk I.I., Yushytsyna Ya.O. *Spektral'ni kharakterystyky khvyl', zbudzhenykh fazovo-modul'ovanykh akustychnym syhnalom v neliniynomu heofizychnomu seredovyshchi* [Spectral characteristics of phase-modulated acoustic waves generated by acoustic signal in nonlinear geophysical medium]. *Geoinformatika (Ukraina)*, 2014, no. 2 (50), pp. 59-65.
12. Aleksandrov V., Busher M., Kazakov Ju., Majorov V. *Razvitiye opyta akusticheskoy obrabotki produktivnoy zony skvazhin* [The development of experience of wells productive zone]. *Technologies FEC*, 2003, no. 2, pp. 1-9.

Надійшла до редакції 12.02.2015 р.

Received 12/02/2015