

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

## ПІДВИЩЕННЯ ДЕБІТУ СВЕРДЛОВИН НА ПІЗНІЙ СТАДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАФТОВОГО ПОКЛАДУ

Розроблено метод підвищення дебіту свердловин на пізній стадії експлуатації нафтового покладу. Обробку нелінійного геофізичного середовища пласта здійснюють імпульсною бігармонічною дією. Це допомагає покращенню фільтрації флюїду в нафтовому пласті з бульбашками газу, що супроводжується підвищенням дебіту видобувних свердловин.

**Ключові слова:** бігармонічна дія, дебіт, нафтовий поклад, нелінійне середовище, бульбашки газу, свердловина.

Відомо, що на пізній стадії експлуатації нафтового покладу пластовий тиск у продуктивному пласті знижується. За зниження тиску до величини, меншої за тиск насичення нафти газом, з нафти виділяється газ, що раніше знаходився в розчиненому стані. При цьому в нафтоносному пласті спостерігається бульбашковий режим течії з низьким коефіцієнтом нафтовіддачі.

У роботах [6, 8] наголошується, що у випадку неньютонівських рідин з бульбашками виникає явище, коли фізичні властивості одного середовища (наприклад нафти) істотно змінюються за невеликих щодо маси і об'єму домішків іншого середовища (бульбашки газу) [8].

У разі імпульсної дії низькочастотної акустичної хвилі на нелінійне бульбашкове середовище воно випромінює високочастотні коливання [3, 4, 7]. Бульбашки, що наповнені газом, діють як резонансні нелінійні осцилятори із загасанням. Власна частота коливань бульбашок залежить від їх радіусів, початкового тиску в низькочастотній хвилі і показника адіабати в рівнянні стану газу.

Високочастотна імпульсна обробка нафти супроводжується зниженням її коефіцієнта динамічної в'язкості в 1,5–4 рази [4], що приводить до послаблення зв'язку нафти з твердою фазою середовища нафтового пласта і поліпшення фільтрації флюїду.

З метою інтенсифікації видобутку нафти рекомендується обробляти нафтовий пласт потужною низькочастотною акустичною дією [1, 9]. Іншим ефективним методом є застосування акустичних коливань бігармонічної дії [5]. У зв'язку з цим становить науковий і практичний інтерес задача про взаємодію нелінійного бульбашкового середовища з бігармонічним коливанням вигляду

$$u = u_0 \sin \omega t + m u_0 \sin(N\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де  $u_0$  і  $\omega$  – амплітуда і колова частота потужного низькочастотного коливання;  $\varphi$  – зсув за фазою слабкого високочастотного коливання;  $m \ll 1$ ,  $N \gg 1$  – довільні раціональні числа.

У статті [5] отримано неоднорідне хвильове рівняння, що описує поширення акустичних хвиль у нелінійному геофізичному середовищі, у вигляді

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

де  $c$  – швидкість поширення звуку в середовищі;  $\gamma$  – показник адіабати Пуассона в рівнянні стану середовища.

Проведемо аналіз рівняння (2) методом послідовних наближень і визначимо частоти, які можуть виникати за поширення бігармонічного акустичного коливання (1) в нелінійному геосередовищі.

Вважаючи нелінійні ефекти слабкими, у першому наближенні нехтуємо в рівнянні (2) його правою частиною. При цьому отримуємо 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 за нульових початкових і граничних умов

$$u_1(t=0) = 0; \quad u_1(x=0) = u_0 \sin \omega t + m u_0 \sin(N\omega t + \varphi)$$

має вигляд

$$u_1(x, t) = u_0 \sin \omega t + m u_0 \sin(N\omega t + \varphi), \quad (3)$$

де  $\tau = t - x/c$ .

Для знаходження розв'язку другого наближення  $u_2(x, t)$  у праву частину нелінійного рівняння (2) слід підставити відповідні похідні функції (3).

З урахуванням співвідношення (3) визначимо

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial x} = -u_0 \left( \frac{\omega}{c} \right) \left[ \cos \omega t + m N \cos(N\omega t + \varphi) \right]; \\ \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = -u_0 \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \left[ \sin \omega t + m N^2 \sin(N\omega t + \varphi) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Підставивши співвідношення (4) в праву частину рівняння (2), після перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned}
 F(\omega, \tau) &= (\gamma+1)u_0^2 \left(\frac{\omega}{c}\right)^3 \times \\
 &\times \left[ \frac{1}{2} \sin 2\omega\tau + \frac{mN^2}{2} \sin((N-1)\omega\tau + \varphi) + \frac{mN^2}{2} \times \right. \\
 &\times \sin((N+1)\omega\tau + \varphi) - \frac{mN}{2} \sin((N-1)\omega\tau + \varphi) + \\
 &\left. + \frac{mN}{2} \sin((N+1)\omega\tau + \varphi) + \frac{m^2N^3}{2} \sin 2(N\omega\tau + \varphi) \right] + \\
 &+ \frac{1}{2}(\gamma+1)(\gamma+2)u_0^3 \left(\frac{\omega}{c}\right)^4 \left[ \left(\frac{m^2N^2}{2} + \frac{1}{4}\right) \sin \omega\tau + \frac{1}{4} \sin 3\omega\tau - \right. \\
 &- \frac{mN}{2} \sin((N-2)\omega\tau + \varphi) + \frac{mN}{2} \sin((N+2)\omega\tau + \varphi) - \\
 &- \frac{m^2N^2}{2} \sin((2N-1)\omega\tau + 2\varphi) + \frac{m^2N^2}{2} \times \\
 &\times \sin((2N+1)\omega\tau + 2\varphi) + \frac{(m^2N^2+1)mN^2}{2} \sin(N\omega\tau + \varphi) + \\
 &+ \frac{mN^2}{4} \sin((N-2)\omega\tau + \varphi) + \frac{mN^2}{4} \sin((N+2)\omega\tau + \varphi) + \\
 &+ \frac{m^2N^3}{2} \sin((2N-1)\omega\tau + 2\varphi) + \frac{m^2N^3}{2} \times \\
 &\times \sin((2N+1)\omega\tau + 2\varphi) - \frac{m^3N^4}{4} \sin(N\omega\tau + \varphi) + \\
 &\left. + \frac{m^3N^4}{4} \sin 3(N\omega\tau + \varphi) \right]. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Враховуючи, що  $N \gg 1$ , з (5) дістанемо:

$$\begin{aligned}
 F(\omega, \tau) &= \left(\frac{\gamma+1}{2}\right) u_0^2 \left(\frac{\omega}{c}\right)^3 \left[ \sin 2\omega\tau + 2mN^2 \sin(N\omega\tau + \varphi) + \right. \\
 &+ m^2N^3 \sin 2(N\omega\tau + \varphi) \left. \right] + \left(\frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{4}\right) u_0^3 \left(\frac{\omega}{c}\right)^4 \times \\
 &\times \left[ \left(m^2N^2 + \frac{1}{2}\right) \sin \omega\tau + \frac{1}{2} \sin 3\omega\tau + (2mN^2 + m^3N^4) \times \right. \\
 &\times \sin(N\omega\tau + \varphi) + 2m^2N^3 \sin 2(N\omega\tau + \varphi) + \\
 &\left. + \frac{m^2N^4}{2} \sin 3(N\omega\tau + \varphi) \right]. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Зауважимо, що при  $m=0$ , тобто коли діє тільки низькочастотний сигнал  $u_0 \sin \omega\tau$ , із виразу (6) одержимо

$$\begin{aligned}
 F_1(\omega, \tau) &= \left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) u_0^2 \left(\frac{\omega}{c}\right)^3 \sin 2\omega\tau + \\
 &+ \frac{(\gamma+1)(\gamma+2)}{8} u_0^3 \left(\frac{\omega}{c}\right)^4 (\sin \omega\tau + \sin 3\omega\tau),
 \end{aligned}$$

що збігається з результатом роботи [4].

Хвильове рівняння другого наближення з правою частиною (6) має вигляд

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = F(\omega, \tau). \quad (7)$$

Рівняння (7) – неоднорідне хвильове рівняння, розв'язок якого через громіздкість обчислювальних процедур не наводимо. Зазначимо, що цей розв'язок можна представити у вигляді суми гармонічних коливань на частотах, що визначаються функцією (6)  $F(\omega, \tau)$  [4].

Зупинимося детальніше на аналізі функції  $F(\omega, \tau)$ . Відповідно до правої частини рівняння (7) виходить, що в цьому нелінійному геофізичному середовищі за дії на нього бігармонічного сигналу (1) генеруються:

- гармонічні коливання на висхідній низькій частоті  $\omega$  і вищих частотах  $2\omega$  і  $3\omega$ ;
- гармонічні коливання із значно вищими частотами  $N\omega$  ( $N \gg 1$ ) із зсувом за фазою  $\varphi$ .

Як видно із виразу (6), амплітуди високочастотних коливань можуть значно зростати порівняно з амплітудою висхідного низькочастотного коливання.

Для оцінки амплітудних значень коливань, що випромінюються бульбашками газу, як приклад прийнято такі вихідні дані:  $u_0 = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $\gamma = 4/3$ ;  $c = 1500$  м/с;  $\omega = 1256$  с $^{-1}$  ( $f_n = 200$  Гц – низька частота);  $m = 1 \cdot 10^{-2}$ ,  $N = 2 \cdot 10^2$ , при цьому  $N\omega = 251200$  с $^{-1}$  ( $f_n = 40$  кГц – висока частота). З використанням залежності (6) визначено амплітуди хвильових коливань, що випромінюються в нелінійному геофізичному середовищі:

Частота $f$ , кГц	Амплітуда, м $^{-1}$
0,2	$3,06 \cdot 10^{-8}$
0,4	$2,74 \cdot 10^{-6}$
0,6	$3,82 \cdot 10^{-9}$
40	$2,21 \cdot 10^{-3}$
80	$2,20 \cdot 10^{-1}$
120	$2,20 \cdot 10^{-3}$

З наведених даних видно, що амплітуда високочастотних складових, що випромінюються бульбашками газу в нелінійному геофізичному середовищі, за бігармонічної взаємодії з цим середовищем коливання, що складається з інтенсивного низькочастотного ( $u_0 = 2 \cdot 10^{-3}$  м) і слабого високочастотного коливань ( $mu = 2 \cdot 10^{-5}$  м), різко зростає в інтервалі 40–120 кГц. Подібні явища можуть спостерігатися за взаємодії низькочастотного сейсмоакустичного шуму з високочастотними коливаннями, випромінюваними структурними елементами геосередовища (зерна), а також за імпульсної дії на пласт різних спрямованих і техногенних джерел [2]. Відомо, що геофізичне середовище пласта є відкритою термодинамічною системою і перебуває у напруженому стані під дією зовнішніх і

внутрішніх сил; розподіл напружень залежить від міри неоднорідності, тріщинуватості геосередовища; зміна напруженого стану порід унаслідок розробки корисних копалин та інших чинників зумовлює їх деформацію, приводить до перебудови системи тріщин, появи нових дефектів, що, як відомо, супроводжується акустичною емісією [10] (випромінюванням високочастотних коливань).

Урахування наведених чинників сприяє глибшій високочастотній імпульсній обробці геофізичного середовища нафтового пласта з бульбашками газу, що супроводжується поліпшенням фільтрації флюїду і підвищенням дебітів видобувних свердловин на пізній стадії експлуатації нафтового покладу.

1. *Боголюбов Б.Н.* Интенсификация добычи нефти низкочастотным акустическим воздействием / Б.Н. Боголюбов, В.Н. Лобанов, Л.С. Бриллиант и др. // Нефть. хоз-во. – 2000. – № 9. – С. 80–81.
2. *Дьяконов Б.П.* Сейсмоакустические шумы на глубоких горизонтах / Б.П. Дьяконов, А.К. Троянов, А.Н. Назаров, В.А. Фадеев // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 309, № 2. – С. 314–319.

3. *Кедринский В.К.* Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // Прикл. механика и техн. физика. – 1968. – № 4. – С. 29–34.
4. *Нагорный В.П.* Импульсные методы интенсификации видобутку вуглеводнів / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк. – К.: Ессе, 2012. – 323 с.
5. *Нагорный В.П.* Підвищення нафтогазовіддачі пластів способом акустичної дії / В.П. Нагорний, І.І. Денисюк, Я.О. Юшицина // Геоінформатика. – 2012. – № 4. – С. 19–21.
6. *Накоряков В.Е.* Распространение волн в газо- и парожидкостных средах / В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев, И.Р. Шрейбер. – Новосибирск: Ин-т теплофизики АН СССР, 1983. – 238 с.
7. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
8. *Поздеев В.А.* Импульсные возмущения в газожидкостных средах / В.А. Поздеев, Н.М. Бескаравайный, В.Г. Ковалев / Отв. ред. В.В. Дыхта. – Киев: Наук. думка, 1988. – 116 с.
9. *Потапов Г.А.* Оценка эффективности мощного низкочастотного акустического излучения на призабойную зону / Г.А. Потапов, В.М. Правдухин // Нефть. хоз-во. – 2000. – № 9. – С. 82–85.
10. *Симонов Б.Ф.* Вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты с земной поверхности / Б.Ф. Симонов, Н.А. Опарин, Н.А. Канискин и др. // Там же. – 2000. – № 5. – С. 41–46.

*Институт геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,  
Київ, Україна  
E-mail: vgv\_nagorny@ukr.net*

*Надійшла до редакції 18.02.2013 р.*

*В.П. Нагорный, И.И. Денисюк, Я.А. Юшицина*

## **ПОВЫШЕНИЕ ДЕБИТА СКВАЖИН НА ПОЗДНЕЙ СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНОЙ ЗАЛЕЖИ**

Разработан метод повышения дебита скважин на поздней стадии эксплуатации нефтяной залежи. Обработка нелинейной геофизической среды пласта осуществляется импульсным бигармоническим воздействием. Это способствует улучшению фильтрации флюида в нефтяном пласте с пузырьками газа, что сопровождается повышением дебита добывающих скважин.

**Ключевые слова:** бигармоническое воздействие, дебит, нефтяная залежь, нелинейная среда, пузырьки газа, скважина.

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

## **THE INCREASE OF WELL PRODUCTION AT THE ADVANCED STAGE OF OIL DEPOSIT OPERATION**

A method of well production growth at the advanced stage of oil deposit operation is developed. The processing of nonlinear geophysical medium is carried out by the impulse biharmonic action. This method facilitates fluid filtration in the oil deposit containing gas bubbles, thus increasing well production.

**Keywords:** biharmonic action, yield, oil deposit, nonlinear medium, bubbles, well.