

© **В.П. Нагорний**
 д-р техн. наук
І.І. Денисюк
 канд. техн. наук
 ІГФНАН України
Т.А. Швейкіна
 УкрНДІгаз

Розподіл енергії імпульсної дії у привибійній зоні пласта за частотами

УДК 532.595

Із використанням теорії спектрів розроблено аналітичні залежності, що допомагають проводити розрахунки частотного розподілу енергії імпульсного навантаження на масив у привибійній зоні пласта.

Ключові слова: енергія, імпульс, пласт, спектр, частота.

С использованием теории спектров разработаны аналитические зависимости, позволяющие производить расчеты частотного распределения энергии импульсного нагружения на массив в привибийной зоне пласта.

Ключевые слова: энергия, импульс, пласт, спектр, частота.

The analytical relations are developed using the theory of spectra, which allows us to calculate the frequency distribution of impulse load energy in bottomhole zone.

Key words: energy, impulse, layer, spectrum, frequency.

Під час проведення імпульсної обробки масиву у привибійній зоні пласта з метою створення штучної тріщинуватості та поліпшення фільтраційних властивостей порід-колекторів важливе значення має режим навантаження, а саме розподіл енергії навантаження по діапазонах частот. Для розширення області імпульсного оброблення масиву необхідно формувати такі навантаження, щоб основна частина енергії була зосереджена в низькому діапазоні частот, тому що такі частоти зі збільшенням відстані від джерела збурення згасають меншою мірою порівняно з високими частотами [1].

Для вибору найбільш оптимального режиму імпульсного навантаження на масив дослідимо розподіл енергії по різних діапазонах частот у процесі розповсюдження імпульсного збурення по гірському масиву.

Нехай імпульсна дія, що генерується в процесі підривання вибухової речовини, описується функцією:

$$\sigma(t) = \sigma_m f(t). \quad (1)$$

Згідно з роботою [2], спектральна щільність вибухової дії (1) визначається за формулою:

$$S(\omega) = |S(j\omega)|, \\ \text{де } S(j\omega) = \sigma_m \int_0^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt; \quad j = \sqrt{-1} - \text{уявна одиниця.}$$

Енергію вибухової дії, що описується залежністю (1), представимо у вигляді [2]:

$$W(\omega) = \pi^{-1} \int_0^{\infty} S^2(\omega) d\omega. \quad (2)$$

Доля енергії вибухової дії n , що припадає на певний інтервал частот $\omega_1 \dots \omega_2$, визначається як відношення визначених інтегралів:

$$n = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S^2(\omega) d\omega / \int_0^{\infty} S^2(\omega) d\omega.$$

Розподіл енергії імпульсної дії по різних діапазонах частот розглянемо на прикладі, коли дія задається згідно з виразом

$$\sigma(t) = \sigma_m \exp(-t/\theta), \quad (3)$$

де θ – параметр часу, який залежить від фізико-механічних властивостей гірської породи, с.

Із урахуванням виразу (3) знайдемо спектральну щільність:

$$S(j\omega) = \sigma_m \int_0^{\infty} \exp(-t/\theta) \exp(-j\omega t) dt = \sigma_m \int_0^{\infty} \exp(-(1/\theta + j\omega) t) dt = \\ = \sigma_m \frac{\exp(-(1/\theta + j\omega) t) \Big|_0^{\infty}}{-(1/\theta + j\omega)} = \frac{\sigma_m}{1/\theta + j\omega}; \\ S(\omega) = S|j\omega| = \frac{\sigma_m}{(1/\theta^2 + \omega^2)^{1/2}}.$$

Відповідно до виразу (2) енергію імпульсної дії (3) представимо у вигляді:

$$W(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma_m^2}{1/\theta^2 + \omega^2} d\omega.$$

Долю енергії, що припадає на певний діапазон частот, визначають із виразу:

$$n = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{1/\theta^2 + \omega^2} / \int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1/\theta^2 + \omega^2} = \frac{2}{\pi} (\arctg\theta\omega_2 - \arctg\theta\omega_1). \quad (4)$$

Параметр часу θ у міру розповсюдження імпульсної дії від джерела вибуху визначають із залежності [3]:

$$\theta = B \left(\frac{r}{r_3} \right)^u \rho c, \quad c,$$

де ρ – щільність гірської породи; c – швидкість розповсю-

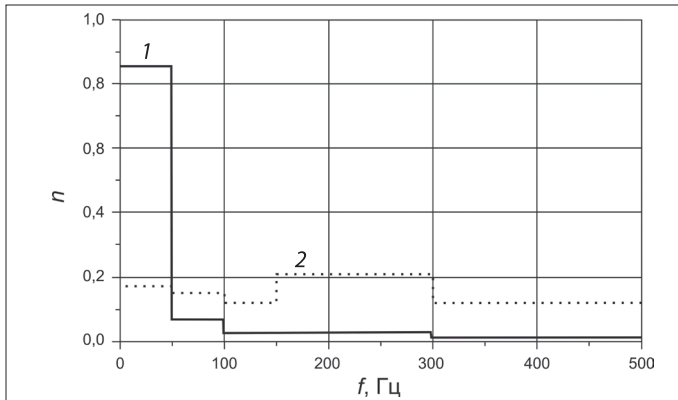


Рис. 1. Розподіл доли n енергії імпульсної дії залежно від частоти f на відстані: 1 – $r = 50r_3$; 2 – $r = 10r_3$

дження повздовжніх хвиль; B, μ – параметри, що залежать від типу гірської породи.

Для прикладу: для вапняку ($\rho=2\ 390\text{ кг/м}^3$; $c=3\ 880\text{ м/с}$) значення параметра θ на різних відстанях від джерела вибуху приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення θ на різних відстанях від джерела вибуху

r/r_3	1	10	20	30	40	50
$\theta, \text{с}$	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,88 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$7,04 \cdot 10^{-3}$	$10,6 \cdot 10^{-3}$	$13,64 \cdot 10^{-3}$

де r/r_3 – відносна відстань від джерела вибуху; r_3 – радіус заряду.

Результати розрахунків частотного розподілу доли n енергії вибухового навантаження на різних відстанях від джерела вибуху за формулою (4) із урахуванням даних табл. 1 зведено в табл. 2.

Таблиця 2

Частотний розподіл доли n енергії вибухового навантаження на різних відстанях від джерела вибуху

Відносна відстань r/r_3 від джерела навантажень	Доля n енергії в діапазоні частот, Гц				
	0–50	50–100	100–150	150–300	300–500
1	0,120	0,114	0,100	0,210	0,150
10	0,170	0,150	0,120	0,210	0,120
20	0,600	0,180	0,070	0,074	0,030
40	0,813	0,091	0,031	0,032	0,013
50	0,850	0,070	0,025	0,025	0,010

За даними табл. 2 побудовано графіки розподілу доли n енергії імпульсної дії залежно від частоти f (рис. 1) і параметра часу θ (рис. 2).

Графіки рис. 2 показують, що для кожного із діапазонів частот існує оптимальне значення параметра $\theta_{\text{опт}}$, при якому n досягає максимального значення, тобто вихід енергії вибухової дії максимальний. Визначимо його аналітично. Для цього знаходимо похідну виразу (4) за параметром θ і прирівнюємо її до нуля:

$$\frac{\omega_2}{1 + (\theta\omega_2)^2} - \frac{\omega_1}{1 + (\theta\omega_1)^2} = 0. \tag{5}$$

Із співвідношення (5) знаходимо

$$\theta_{\text{опт}} = \frac{1}{(\omega_1\omega_2)^{1/2}} = \frac{1}{2\pi(f_1f_2)^{1/2}}. \tag{6}$$

Із виразу (6) знаходимо значення $\theta_{\text{опт}}$ для різних діапазонів частот (табл. 3).

Таблиця 3

Значення $\theta_{\text{опт}}$ для різних діапазонів частот

$f_1 \dots f_2, \text{Гц}$	1...20	20...50	50...100	100...150
$\theta_{\text{опт}}, \text{с}$	$3,56 \cdot 10^{-3}$	$5,03 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Отже, тривалість вибухового навантаження, що характеризується параметром θ , суттєво впливає на частотний розподіл енергії вибухової дії на гірський масив (див. рис. 2). Цей параметр змінюється залежно від відстані до джерела вибуху. На малих відстанях від джерела вибуху (1...10) r_3 у спектрі присутні більш високі частоти (до 500 Гц). На більших відстанях (40...50) r_3 , основна енергія вибуху зосереджена на частотах у діапазоні (0...50) Гц (див. рис. 1).

Розглянемо більш складний вид вибухового навантаження. У роботі [4] представлено математичну модель вибухового імпульсу, що діє на стінки порожнини і описується функцією вигляду:

$$\sigma(t) = \sigma_m k_1 (\exp(-\alpha t/t_r) - \exp(-m\alpha t/t_r)), \tag{7}$$

де t_r – час наростання радіальної компоненти імпульсу σ_r до максимального значення σ_m ; $k_1 = [\exp(-\alpha) - \exp(m\alpha)]^{-1}$; $\alpha = \ln m(m-1)^{-1}$, $m > 1$; m – параметр, що регулює тривалість імпульсу.

Використавши приведений вище алгоритм розрахунку, одержимо залежність для визначення доли n енергії під час вибухового навантаження вигляду (7):

$$n = \frac{2}{\pi} \frac{m}{m-1} \left[\left(\arctg \frac{\omega_2 t_r}{\alpha} - \arctg \frac{\omega_1 t_r}{\alpha} \right) - \frac{1}{m} \left(\arctg \frac{\omega_2 t_r}{m\alpha} - \arctg \frac{\omega_1 t_r}{m\alpha} \right) \right]. \tag{8}$$

У роботі [5] приведено залежність для визначення параметра t_r для різних гірських порід:

$$t_r = aQ^{1/3} + br, \tag{9}$$

де a, b – експериментальні коефіцієнти, що залежать від типу гірської породи; Q – маса заряду ВР, кг; r – відстань

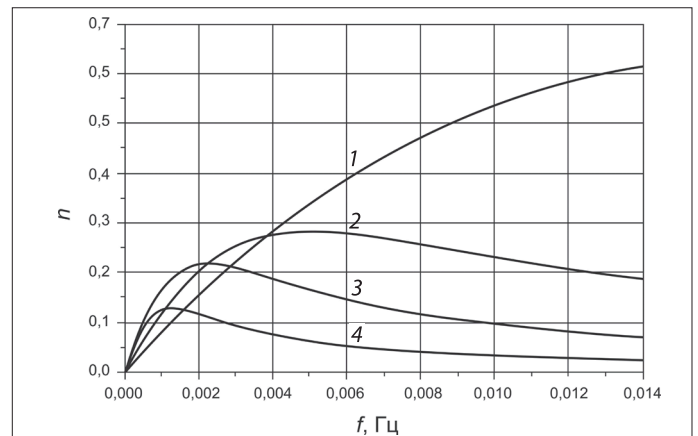


Рис. 2. Розподіл доли n енергії імпульсної дії залежно від параметра часу θ у діапазоні частот: 1 – 1...20 Гц, 2 – 20...50 Гц, 3 – 50...100 Гц, 4 – 100...150 Гц відповідно

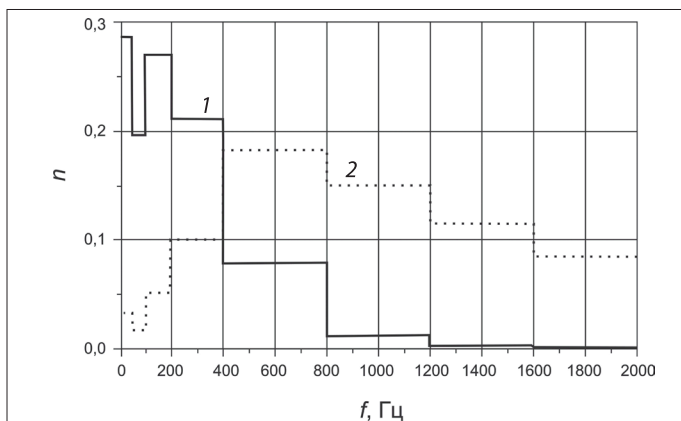


Рис. 3. Розподіл доли n енергії імпульсної дії залежно від частоти f на відстані: $1 - r = 100r_3$; $2 - r = 10r_3$

від джерела навантаження, м.

Залежність (9) із використанням значень коефіцієнтів a і b , згідно з [5], має вигляд:

$$\text{для вапняку } t_r = 0,8 \cdot 10^{-5} Q^{1/3} + 0,0973 \cdot 10^{-3} r;$$

$$\text{для мармуру } t_r = 1,0 \cdot 10^{-5} Q^{1/3} + 0,5084 \cdot 10^{-3} r;$$

$$\text{для граніту } t_r = 0,5 \cdot 10^{-5} Q^{1/3} + 0,0483 \cdot 10^{-3} r.$$

Із використанням залежності (8) побудовано табл. 4, де приведено розрахункові дані частотного розподілу n енергії вибухового навантаження вигляду (7) у вапняку на відстанях $10r_3$ і $100r_3$ при $m=2$ і $Q=1,0$ кг ($r_3=0,054$ м).

Таблиця 4

Частотний розподіл доли n енергії вибухового навантаження у вапняку на різних відстанях від джерела вибуху

r/r_3 , м	Доля n енергії у діапазоні частот, Гц							
	0...50	50... 100	100... 200	200... 400	400... 800	800... 1200	1200... 1600	1600... 1800
10	0,033	0,018	0,052	0,101	0,183	0,149	0,115	0,085
100	0,285	0,196	0,270	0,210	0,078	0,012	0,003	0,001

За даними табл. 4 побудовано графіки розподілу доли n енергії імпульсної дії залежно від частоти f (рис. 3).

Висновок

Одержані аналітичні залежності (4) і (8) дають змогу прогнозувати частотний розподіл енергії вибухової дії, що допомагає активно керувати процесом імпульсного наван-

таження з метою створення штучної тріщинуватості і поліпшення фільтраційних властивостей порід-колекторів у привибійній зоні пласта.

Список літератури

1. **Друкований М.Ф.** Действие взрыва в горных породах / М.Ф. Друкований, В.М. Комир, В.М. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1973. – 184 с.
2. **Харкевич А.А.** Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.: Физматгиз, 1962. – 236 с.
3. **Оксанич И.Ф.** Закономерности дробления горных пород взрывом и прогнозирование гранулометрического состава / И.Ф. Оксанич, П.С. Миронов. – М.: Недра, 1982. – 165 с.
4. **Ефремов Э.И.** Основы теории и методы взрывного дробления горных пород / Э.И. Ефремов, В.С. Кравцов, Н.И. Мячина [и др.]. – К.: Наук. думка, 1979. – 224 с.
5. **Михалюк А.В.** Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов / А.В. Михалюк. – К.: Наук. думка, 1986. – 208 с.

Автори статті



Нагорний Володимир Петрович

Доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Освіта за фахом – механік. Основний напрям 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 наукових досліджень – імпульсні методи підвищення дебіту видобувних свердловин.



Швейкіна

Тетяна Адамівна

Науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту природних газів. За фахом – хімік. Основний напрям діяльності – хімічна обробка продуктивного пласта.

