

Дослідження та методи аналізу

УДК 622.243.26

DOI: 10.31471/1993-9973-2019-2(71)-30-37

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ КЕРУВАННЯ КАВІТАЦІЙНО-ІМПУЛЬСНОЮ ДІЄЮ НА ВИБІЙ СВЕРДЛОВИНИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ СПЕКТРІВ

*І.І. Чудик, Я. М. Фем'як**

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, Карпатська 15, тел. (0342) 727137,
e-mail: chudoman@ukr.net, jfemjak@gmail.com*

Розглядається технологія інтенсифікації руйнування гірських порід при бурінні свердловин за рахунок обґрунтування фізико-механічних, кавітаційних і технологічних процесів. Подальший розвиток механізму руйнування гірських порід за рахунок створюваних кавітаційних процесів, проявлення яких можливе на вибої свердловини при бурінні сучасними типами бурових доліт, є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить значно підвищити ефективність і надійність буріння свердловин, має важливе практичне значення для нафтогазової галузі. Отримали подальший розвиток механізми руйнування гірських порід при бурінні свердловин, які дозволяє враховувати як постійне механічний вплив на гірську породу озброєння бурового долота і кавітаційний вплив на поверхню вибою охолоджуючої промивної рідини. Вперше доведено, що кавітаційно-імпульсна обробка вибою свердловини при бурінні дозволяє оцінити ерозійну дію кавітації при різних відстанях від кавітатора з урахуванням дисипативних втрат і збільшити частку енергії, що спрямовується на гірську породу. Вперше обґрунтована можливість вибору найбільш оптимального режиму кавітаційно-імпульсного навантаження на вибій свердловини. Для оцінки ефективності технології кавітаційно-пульсаційного промивання запропоновані аналітичні залежності, що дозволяють спрогнозувати частотний розподіл енергії від лускання кавітаційних пухирців, що створюються кавітатором на вибої свердловини, що дозволяє активно управляти процесом кавітаційно-імпульсного впливу на гірські породи в процесі їх руйнування при бурінні. Наведено характеристики, що в більш повній мірі відображають кавітаційно-пульсаційний процес і, тим самим, дозволяють точніше оцінити його ефективність в руйнуванні порід на вибої свердловини. При проведенні кавітаційно-імпульсної обробки вибою свердловини з метою створення штучної тріщинуватості значення має режим навантаження, а саме розподіл енергії навантаження по діапазонах частот. Для розширення області кавітаційно-імпульсної обробки масиву гірської породи необхідно формувати такі навантаження, щоб основна частина енергії була зосереджена в низькому діапазоні частот, тому що низькі частоти із збільшенням відстані від джерела збурення (кавітатора) згасають в меншій мірі у порівнянні з високими частотами. Досліджено розподіл енергії по різних діапазонах частот в процесі поширення кавітаційно-імпульсної дії по гірському масиву порід з метою вибору найбільш оптимального режиму кавітаційно-імпульсного навантаження на вибій свердловини. Запропоновані аналітичні залежності, що дозволяють спрогнозувати частотний розподіл енергії, яка виділяється при лусканні кавітаційних пухирців на вибої свердловини. Це надає можливість активно керувати процесом кавітаційно-імпульсного впливу на гірські породи в процесі їх руйнування при бурінні.

Ключові слова: гірська порода, свердловина, кавітація, імпульс, енергія, частота.

Рассматривается технология интенсификации разрушения горных пород при бурении скважин за счет обоснования физико-механических, кавитационных и технологических процессов. Дальнейшее развитие механизма разрушения горных пород за счет создаваемых кавитационных процессов, проявление которых возможно на забое скважины при бурении современными типами буровых долот, является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит значительно повысить эффективность и надежность бурения скважин, имеет важное практическое значение для нефтегазовой отрасли. Получили дальнейшее развитие механизмы разрушения горных пород при бурении скважин, которые позволяют учитывать как постоянное механическое воздействие на горную породу вооружения бурового долота и кавитационное воздействие на поверхность забоя охлаждающей промывочной жидкости. Впервые доказано, что кавитационно-импульсная обработка забоя скважины при бурении позволяет оценить эрозионное действие кавитации при различных расстояниях от кавитатора с учетом диссипативных потерь и увеличить долю энергии, направляемой на горную породу. Впервые обоснована возможность выбора наиболее оптимального режима кавитационно-импульсной нагрузки на забой скважины. Для оценки эффективности технологии кавитационно-пульсационной промывки предложены аналитические зависимости, позволяющие спрогнозировать частотное распределение энергии от схлопывания кавитационных пузырьков, создаваемых кавитатором на забое скважины, что позволяет активно управлять процессом кавитационно-импульсного воздействия на горные породы в процессе их разрушения при бурении. Приведены характеристики, которые более в полной мере отражают кавитационно-пульсационный процесс и, тем самым, позволяют точнее оценить его эффективность в разрушении пород на забое скважины. При проведении кавитационно-импульсной обработки забоя скважины с целью создания искусственного трещинообразования значение имеет режим нагрузки, а именно распределение энергии нагрузки по диапазонам частот. Для расширения области кавитационно-импульсной обработки массива горной породы необходимо формировать такие нагрузки, чтобы основная часть энергии была сосредоточена в низком диапазоне частот, так как низкие частоты с увеличением расстояния от источника возмущения (кавитатора) угасают в меньшей степени по сравнению с высокими частотами. Исследовано распределение энергии по различным диапазонам частот в процессе распространения кавитационно-импульсного воздействия по горному массиву пород с целью выбора наиболее оптимального режима кавитационно-импульсной нагрузки на забой скважины. Предложенные аналитические зависимости, позволяющие спрогнозировать частотное распределение энергии, которая выделяется при схлопывании кавитационных пузырьков на забое скважины. Это дает возможность активно управлять процессом кавитационно-импульсного воздействия на горные породы в процессе их разрушения при бурении.

Ключевые слова: горная порода, скважина, кавитация, импульс, энергия, частота.

The authors consider the technology of intensification of the rock failure during the drilling of the wells using the substantiation of physico-mechanical, cavitation and technological processes. Further development of the mechanism of rock failure due to the created cavitation processes, the manifestation of which is possible at the well bottom when drilling with modern types of drill bits, is an important scientific and technical problem. The solution of this problem will significantly increase the efficiency and reliability of drilling the wells. The development of the mechanism is of great practical importance for oil-and-gas industry. The authors have further developed the mechanisms of rock failure during drilling, which allow to take into account as constant actions both the mechanical effect of the drill bit cutting structure on the rock and the cavitation effect of the cooling flushing fluid on the bottom-hole surface. For the first time it has been proved that cavitation-impulse treatment of a bottom during drilling allows to evaluate the erosion effect of cavitation at various distances from the cavitator, taking into account dissipative losses, and to increase the proportion of energy directed to the rock. For the first time, the possibility of choosing the most optimal mode of cavitation-impulse load at the bottom of a well has been substantiated. To evaluate the effectiveness of the cavitation-pulsation washing technology, analytical dependencies have been proposed. Those dependencies allow to predict the frequency distribution of energy from the collapse of cavitation bubbles created by the cavitator at the bottom of the well. It allows to control actively the process of cavitation-impulse impact on rocks in course of their failure during drilling. The authors provide characteristics that show the cavitation-pulsation process fully. Thus, these characteristics allow to evaluate the effectiveness of the process in the rocks failure at the bottom-hole more accurately. When conducting cavitation-impulse treatment of the bottomhole, in order to create artificial cracking, the load mode, namely the distribution of the load energy over frequency ranges, is of importance. To expand the area of the cavitation-impulse treatment of the rock mass, it is necessary to form such loads that the main part of the energy is concentrated in the low frequency range. With the increase of the distance from the perturbation source (cavitator) low frequencies attenuate less in comparison with high frequencies. In order to choose the most optimal mode of cavitation-impulse load on the bottom hole, the distribution of energy over various frequency ranges in the process of the spread of cavitation-impulse effect on a rock massif has been studied. The suggested analytical dependencies allow to predict the frequency distribution of energy which is released when the cavitation bubbles collapse at the bottom-hole. It gives a possibility to control the process of cavitation-impulse effect on rocks in the process of their failure during drilling.

Key words: rock, well, cavitation, impulse, energy, frequency.

Постановка проблеми. Відомо, що за основні параметри вибухового імпульсу в гірській справі приймають максимальне значення напруження і тривалість дії імпульсу [1]. Змінюючи у той чи інший спосіб ці параметри, здійснюють керування імпульсним навантаженням масиву. Хоча ці характеристики є важливими, практично неможливо, користуючись лише ними, з достатньою точністю передбачити результати кавітаційно-імпульсної дії в гірському масиві порід під час буріння свердловини. Тобто цих двох параметрів імпульсу в нашому випадку, є недостатньо для обґрунтованої розробки кавітаційно-імпульсної технології руйнування породи при бурінні свердловини.

Аналіз досліджень і публікацій. Найповнішу інформацію стосовно кавітаційно-імпульсної технології руйнування породи при бурінні можуть надати спектральні характеристики кавітаційно-імпульсних процесів. Залучення теорії спектрів для дослідження керованої руйнівної дії кавітаційних ефектів – досить ефективний метод вивчення дії імпульсу в різних середовищах. Цьому напряму присвячені деякі роботи, що стосуються подрібнення гірських порід [2], ущільнення ґрунтових масивів [3 - 4], а також розробки імпульсних технологій для застосування у нафтогазовій галузі [5 - 7], однак систематизовані дані щодо вказаного напряму досліджень проте відсутні.

Постановка завдання. В цій статті ми наведемо характеристики, що більш повно відображають кавітаційно-пульсаційний процес, дають змогу точніше оцінити його ефективність у руйнуванні порід на вибої свердловини.

Виклад основного матеріалу. Припустимо, що на деякій відстані r від джерела імпульсної дії (кавітатора) напруження описується аналітичною функцією:

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

Введемо спектральну щільність кавітаційно-імпульсної дії [3]:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (2)$$

де $j = \sqrt{-1}$ - уявна одиниця.

З теорії спектрів відомо, що між співвідношеннями (1) і (2) існує зв'язок:

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (3)$$

Формули (2) і (3) є основними в теорії спектрів. Це подвійне перетворення Фур'є, що пов'язує між собою дійсну функцію часу $f(t)$ і комплексну функцію частоти $S(j\omega)$.

Формула (3) є інтегралом Фур'є в комплексній формі. Її зміст полягає в тому, що функція $f(t)$ представлена сумою синусоїдальних складових, тому вона може бути лише сумою нескінченно великого числа нескінченно малих коливань, нескінченно близьких по частоті. Комплексна амплітуда кожного окремого коливання нескінченно мала і рівна:

$$dC = \frac{1}{\pi} S(j\omega) d\omega. \quad (4)$$

Формулу (3) можна записати в дійсній формі, тоді інтегрування відбуватиметься лише по додатних частотах. Вводячи позначення $S(j\omega) = A(\omega) + jB(\omega)$, і враховуючи, що $A(\omega)$ – парна, а $B(\omega)$ – непарна функції, отримаємо:

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} [A(\omega)\cos \omega t - B(\omega)\sin \omega t] d\omega. \quad (5)$$

Можна отримати ще один запис формули (5):

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} [S(j\omega)e^{j\omega t} + S(-j\omega)e^{-j\omega t}] d\omega. \quad (6)$$

У квадратних дужках стоїть сума спряжених величин, яка рівна подвоєній дійсній частині. Отже,

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(j\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (7)$$

Введемо ще одне уточнення. Підінтегральна функція у формулі (3) буде виражати окремий безкінечно малий доданок коливання з нескінченно малою амплітудою dC :

$$\frac{1}{2\pi} S(j\omega)e^{j\omega t} d\omega = dC e^{j\omega t}, \quad (8)$$

тоді

$$S(j\omega) = \pi \frac{dC}{d\omega}. \quad (9)$$

Отже величина $S(j\omega)$ представляє безпосередньо не амплітуду, а так звану спектральну щільність. Проте, як правило, цю деталь опускають і називають $S(j\omega)$ комплексним спектром неперіодичної функції, а абсолютне значення (модуль) цієї величини $|S(j\omega)| = S(\omega)$ – просто спектром.

Окрім спектральної функції, розглянемо характеристики, які глибше відображають кавітаційно-імпульсний процес:

- енергія спектру:

$$W_S = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S^2(j\omega) d\omega; \quad (10)$$

• діюча тривалість імпульсу Δt (під якою розуміється проміжок часу, в якому зосереджена переважна частина енергії імпульсу), що знаходиться з виразу:

$$\int_{t_0 - \Delta t/2}^{t_0 + \Delta t/2} \sigma^2(t) dt = \mu_i \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2(t) dt = \mu_i A_i, \quad (11)$$

де μ_i – частка повної енергії імпульсу за проміжок часу Δt (як правило приймають $\mu_i = 0,9$);

$$A_i = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2(t) dt - \text{величина, пропорційна повній енергії імпульсу};$$

• діюча ширина спектру Δf , знаходиться з виразу

$$\int_0^{2\pi\Delta t} S^2(j\omega) d\omega = \mu_i \int_0^{\infty} S^2(j\omega) d\omega; \quad (12)$$

• коефіцієнт форми імпульсу $\eta_i = \Delta f \Delta t$, що характеризує не лише форму імпульсу, але і його спотворення при проходженні через вимірювальний тракт з обмеженою смугою робочих частот;

• частоти істотних гармонічних складових, що визначаються за кривою спектру $S(\omega)$.

Спектральна характеристика імпульсного навантаження, що визначається за формулою (2), дозволяє оцінити зміну його параметрів на різних відстанях від джерела імпульсного навантаження (кавітатора) з урахуванням дисипативних втрат.

При поширенні імпульсу в гірському масиві складові спектру поглинаються неоднаково на різних частотах, внаслідок чого змінюється не лише величина, але і форма імпульсу [192]. Якщо прийняти спектральну щільність імпульсу біля стінки свердловини $S_0(\omega)$, то в результаті поглинання спектральна щільність у досліджуваній точці масиву, розташованій на відстані r від джерела імпульсного навантаження, зміниться до величини $S_r(\omega)$.

Значення $S_r(\omega)$ можна визначити із співвідношення:

$$S_r(\omega) = S_0(\omega) \eta_n(\omega) \eta_z, \quad (13)$$

де $\eta_n(\omega)$ – коефіцієнт пропускання середовища; η_z – коефіцієнт розповсюдження хвилі (для плоскої симетрії рівний 1, осової – 2 і центральної – 3).

Розв'язавши рівняння (13) відносно $S_0(\omega)$, знаходимо:

$$S_0(\omega) = \frac{S_r(\omega)}{\eta_n(\omega) \eta_z}. \quad (14)$$

Згідно зі співвідношенням (3) напруження на вибої свердловини визначається формулою:

$$\sigma_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S_r(\omega)}{\eta_n(\omega) \eta_z} e^{j\omega t} d\omega. \quad (15)$$

Інтеграл виду (15) визначають за допомогою теореми, наведеної в [3]. Таким чином, експериментально визначивши спектральну щільність кавітаційно-імпульсної дії на певній відстані від кавітатора, за формулою (15) можна знайти напруження породи на вибої свердловини.

При проведенні кавітаційно-імпульсної обробки вибою свердловини з метою створення штучної тріщинуватості важливе значення має режим навантаження, а саме розподіл енергії навантаження по діапазонах частот. Для розширення області кавітаційно-імпульсної обробки масиву гірської породи необхідно формувати такі навантаження, щоб основна частина енергії була зосереджена в низькому діапазоні частот, оскільки низькі частоти із віддаленням від джерела збурення (кавітатора) згасають повільніше, ніж високі.

Для вибору найбільш оптимального режиму кавітаційно-імпульсного навантаження на вибій свердловини дослідимо розподіл енергії по різних діапазонах частот в процесі розповсюдження імпульсного збурення по гірському масиву [4]. Нехай імпульсна дія, що генерується кавітатором в процесі лускання кавітаційних пухирців, описується функцією:

$$\sigma(t) = \sigma_n f(t). \quad (16)$$

Згідно роботи [5] спектральна щільність вибухової дії (16) визначається за формулою:

$$S(\omega) = |S(j\omega)|, \quad (17)$$

$$\text{де } S(j\omega) = \sigma_m \int_0^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt;$$

$$j = \sqrt{-1} - \text{уявна одиниця.}$$

Енергію від лускання кавітаційних пухирців, що описується залежністю (16), подамо у вигляді [191]:

$$W(\omega) = \pi^{-1} \int_0^{\infty} S^2(\omega) d\omega. \quad (18)$$

Частка енергії імпульсної дії e , що припадає на певний інтервал частот $\omega_1 \dots \omega_2$, визначається як співвідношення визначених інтегралів:

$$e = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} S^2(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S^2(\omega) d\omega}. \quad (19)$$

Розподіл енергії кавітаційно-імпульсної дії по різних діапазонах частот розглянемо на прикладі, коли дія задається за виразом:

Таблиця 1 – Значення величини θ при різних відстанях від кавітатора

$r/r_{к.н}$, мм	20	30	40	50	60	70
θ , с	$0,58 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$10,78 \cdot 10^{-3}$	$14,05 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 2 – Частотний розподіл частки e енергії кавітаційно-імпульсної дії при різних відстанях від кавітатора

Відстань $r/r_{к.н}$ від кавітатора, мм	Частка e енергії в діапазоні частот, Гц				
	0 ÷ 50	50 ÷ 100	100 ÷ 150	150 ÷ 300	300 ÷ 500
20	0,125	0,115	0,100	0,205	0,150
30	0,174	0,157	0,117	0,206	0,122
40	0,610	0,183	0,068	0,070	0,028
50	0,815	0,088	0,027	0,029	0,011
60	0,865	0,068	0,022	0,023	0,008

$$\sigma(t) = \sigma_m \exp(-t/\theta), \quad (20)$$

де θ – постійна часу, яка залежить від фізико-механічних властивостей гірської породи, що піддається руйнуванню с.

Із врахуванням виразу (20) знайдемо спектральну щільність:

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= \sigma_m \int_0^{\infty} \exp(-t/\theta) \exp(-j\omega t) dt = \\ &= \sigma_m \int_0^{\infty} \exp(-(1/\theta + j\omega)t) dt = \\ &= \sigma_m \frac{\exp(-(1/\theta + j\omega)t) \Big|_0^{\infty}}{-(1/\theta + j\omega)} = \frac{\sigma_m}{1/\theta + j\omega}; \\ S(\omega) &= S(j\omega) = \frac{\sigma_m}{(1/\theta^2 + \omega^2)^{0,5}}. \end{aligned} \quad (21)$$

Відповідно з виразом (18), енергію кавітаційно-імпульсної дії (20) можемо подати у вигляді:

$$W(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma_m^2}{1/\theta^2 + \omega^2} d\omega. \quad (22)$$

Частку енергії, що припадає на певний діапазон частот, можемо виразити формулою:

$$e = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{d\omega}{1/\theta^2 + \omega^2}}{\int_0^{\infty} \frac{d\omega}{1/\theta^2 + \omega^2}} = \frac{2}{\pi} (\arctg \theta \omega_2 - \arctg \theta \omega_1). \quad (23)$$

Постійну складову часу θ у міру розповсюдження кавітаційно-імпульсної дії від кавітатора ми можемо визначити за залежністю [5]:

$$\theta = B \left(\frac{r}{r_{к.н}} \right)^{\mu} \rho \cdot c, \quad (24)$$

де ρ – густина гірської породи, кг/м³;

c – швидкість поширення повздовжніх хвиль від лускання кавітаційних пухирців, м/с;

B, μ – параметри, що залежать від типу гірської породи;

$r/r_{к.н}$ – відносна відстань від кавітатора, м;

$r_{к.н}$ – радіус кавітаційної пульпи (з'єднання кавітаційних пухирців), м.

Як приклад, візьмемо породу вапняк ($\rho = 2385 \text{ кг/м}^3$; $c = 3885 \text{ м/с}$). Значення параметру θ на різних відстанях від кавітатора зведемо до таблиці 1.

Результати розрахунків частотного розподілу частки e енергії кавітаційно-імпульсної дії при різних відстанях від кавітатора за формулою (23) з урахуванням даних таблиці 1 зведені в таблицю 2.

За даними таблиці 2 побудуємо графіки розподілу частки e енергії кавітаційно-імпульсної дії в залежності від частоти f (рис. 1) і постійної часу θ (рис. 2).

Графіки, зображені на рисунку 2, свідчать, що для кожного із діапазонів частот існує оптимальне значення параметра θ_{opt} , при якому e досягає свого максимального значення, тобто вихід енергії від лускання кавітаційних пухирців є максимальним. Це значення ми можемо визначити і аналітичним способом. Для цього потрібно знайти похідну від виразу (23) за параметром θ і прирівняти її до нуля:

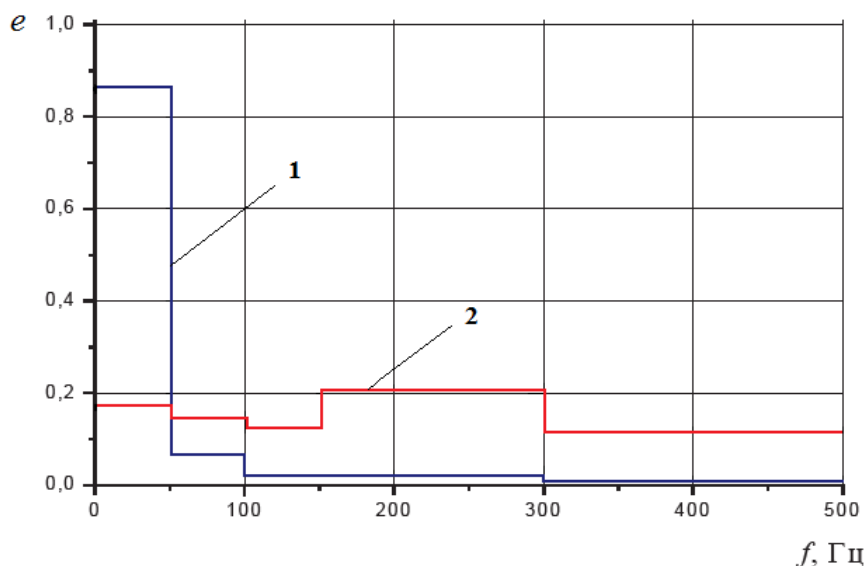
$$\frac{\omega_2}{1 + (\theta \omega_2)^2} - \frac{\omega_1}{1 + (\theta \omega_1)^2} = 0. \quad (25)$$

З цього рівняння, ми можемо оптимальне значення параметра θ_{opt} :

$$\theta_{opt} = \frac{1}{(\omega_1 \cdot \omega_2)^{0,5}} = \frac{1}{2\pi(f_1 \cdot f_2)^{-0,5}}. \quad (26)$$

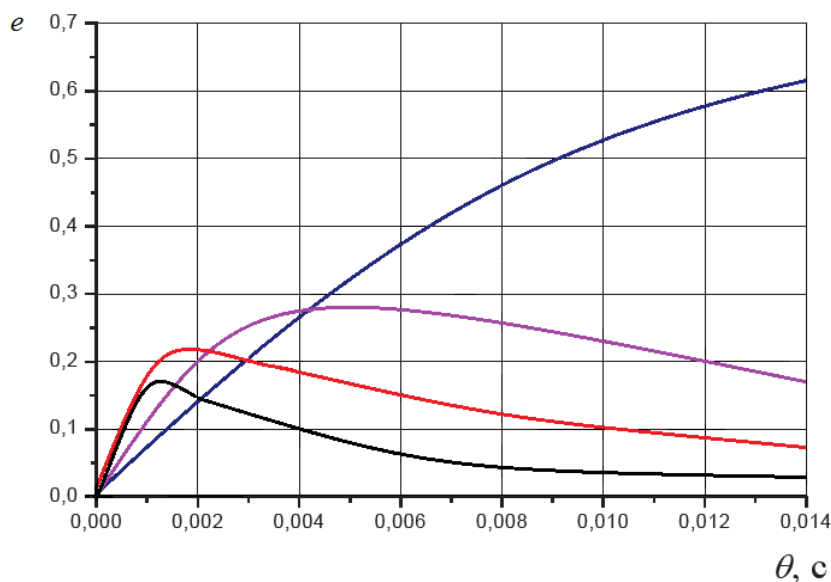
Із виразу (26) знаходимо значення θ_{opt} для різних діапазонів частот (табл. 3).

Як свідчать результати обчислень, тривалість руйнівного навантаження, що характеризується параметром θ , суттєво впливає на частотний розподіл енергії кавітаційно-імпульсної



відстань від кавітатора: 1 – $r = 50 r_{к.н}$, 2 – $r = 30 r_{к.н}$

Рисунок 1 – Розподіл частки e енергії кавітаційно-імпульсної дії залежно від частоти f



діапазони частот: 1 – $1 \div 20$ Гц; 2 – $20 \div 50$ Гц; 3 – $50 \div 100$ Гц; 4 – $100 \div 150$ Гц

Рисунок 2 – Розподіл частки e енергії кавітаційно-імпульсної дії залежно від постійної по часу θ

Таблиця 3 – Значення θ_{opt} для різних діапазонів частот

$f_1 \dots f_2$, Гц	1 ÷ 20	20 ÷ 50	50 ÷ 100	100 ÷ 150
θ_{opt} , с	$3,61 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$

дії на масив гірської породи вибою свердловини (рис. 2). Цей параметр змінюється залежно від відстані до джерела (кавітатора). На малих відстанях від кавітатора ($1 \div 10$) $r_{к.н}$ в спектрі присутні більш високі частоти (до 500 Гц). На більших відстанях ($40 \div 50$) $r_{к.н}$ основна енергія вибуху зосереджена на частотах в діапазоні (0 ÷ 50) Гц (рис. 1).

Розглянемо більш складний вид вибухового навантаження. В роботі [6] розглядається математична модель вибухового імпульсу, що діє на стінки порожнини і описується функцією виду:

$$\sigma(t) = \sigma_m k_1 (\exp(-at/t_r) - \exp(-mat/t_r)), \quad (27)$$

де t_r – час наростання радіальної компоненти імпульсу σ_r до максимального значення σ_m , с;

Таблиця 4 – Частотний розподіл частки e енергії кавітаційно-імпульсної дії на мрамур при різних відстанях від кавітатора

$r/r_{к.н}, м$	Частка e енергії в діапазоні частот, Гц				
	0÷50	50÷100	100÷200	200÷400	400÷800
10	0,030	0,015	0,049	0,100	0,179
100	0,282	0,194	0,267	0,206	0,076

m – параметр, що регулює тривалість кавітаційно-імпульсної дії;

$$k_1 = [\exp(-a) - \exp(ma)]^{-1};$$

$$a = \ln m(m-1)^{-1}, m > 1.$$

Використовуючи наведений вище алгоритм розрахунку, одержимо залежність для визначення частки e енергії при кавітаційно-імпульсному навантаженні у вигляді (27):

$$e = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{m}{m-1} \left[\left(\arctg \frac{\omega_2 t_r}{a} - \arctg \frac{\omega_1 t_r}{a} \right) - \frac{1}{m} \left(\arctg \frac{\omega_2 t_r}{ma} - \arctg \frac{\omega_1 t_r}{ma} \right) \right]. \quad (28)$$

Базуючись на залежності, наведеній в роботі [6], наведена залежність для визначення параметру t_r для різних гірських порід, пропонуємо нашу, яка враховує наближено кількість енергії $E_{к.н}$, що міститься в кавітаційній пульпі (об'єднанні кавітаційних пухирців):

$$t_r = aE_{к.н}^{1/3} + br, \quad (29)$$

де a, b – експериментальні коефіцієнти, що залежать від типу гірської породи;

$E_{к.н}$ – кількість енергії, яка зосереджена в кавітаційних пухирцях;

r – відстань від кавітатора.

Залежність (29) з використанням коефіцієнтів a та b , а також із врахуванням типу гірських порід набуде такого вигляду:

- для мрамру:

$$t_r = 0,8 \cdot 10^{-5} E_{к.н}^{1/3} + 0,0973 \cdot 10^{-3} r; \quad (30)$$

- для силурійського вапняку:

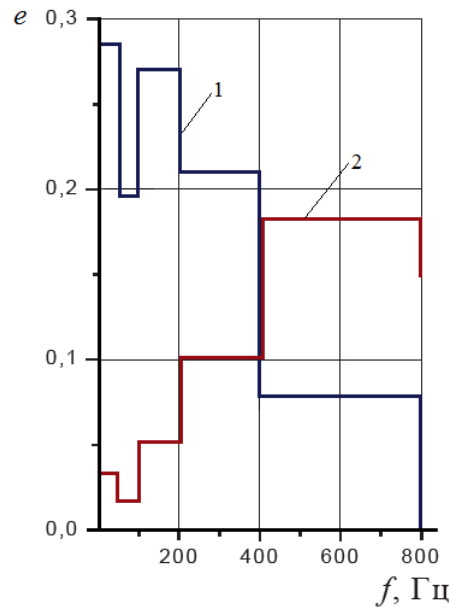
$$t_r = 1,0 \cdot 10^{-5} E_{к.н}^{1/3} + 0,5084 \cdot 10^{-3} r; \quad (31)$$

- для граніту:

$$t_r = 0,5 \cdot 10^{-5} E_{к.н}^{1/3} + 0,0483 \cdot 10^{-3} r. \quad (32)$$

З використанням залежності (28) побудовано таблицю 4, де поєднано розрахункові дані частотного розподілу e енергії кавітаційно-імпульсної дії виду (27) в мрамурі на відстанях $10 r_{к.н}$ і $100 r_{к.н}$ при $m = 2$ і $E = 1,0 кз$ ($r_{к.н} = 0,045 м$).

За даними таблиці 4 побудовані графіки розподілу частки e енергії залежно від частоти f (рис. 3).



відстані: 1 – $r = 100 r_{к.н}$; 2 – $r = 10 r_{к.н}$

Рисунок 3 – Розподіл частки e енергії кавітаційно-імпульсної дії залежно від частоти f

Висновки

З метою розширення існуючих і створення нових тріщин в масиві гірської породи при здійсненні кавітаційно-імпульсної дії на вибій свердловини важливе значення має режим навантаження, а саме розподіл енергії навантаження по діапазонах частот. Для розширення області кавітаційно-імпульсної обробки масиву гірської породи необхідно формувати такі навантаження, щоб основна частина енергії була зосереджена в низькому діапазоні частот, тому що низькі частоти з віддаленням від джерела збурення (кавітатора) згасають повільніше, ніж високі.

Досліджено розподіл енергії по різних діапазонах частот в процесі розповсюдження кавітаційно-імпульсного збурення на гірський масив з метою вибору найбільш оптимального режиму кавітаційно-імпульсного навантаження на вибій свердловини.

Одержано аналітичні залежності (23) і (28), що дозволяють прогнозувати частотний розподіл енергії, отриманої від лускання кавітацій-

них пухирців, створюваних кавітатором на вибої свердловини. Це дає можливість активно керувати процесом кавітаційно-імпульсним впливом на гірські породи під час їх руйнування у процесі буріння.

Література

1. Фем'як Я. М., Яремійчук Р. С. Розробка оптимальних режимів кавітаційного руйнування гірських порід. *Нафтова і газова промисловість*. 2000. № 6. С. 13-15.

2. Друкованый М. Ф. Методы управления взрывом на карьерах. М. : Недра, 1973. 416 с.

3. Денисюк И. И. К вопросу оценки параметров взрывного импульса с помощью его спектральных характеристик. *Использование энергии взрыва на объектах ирригационного и мелиоративного строительства*. Киев : Наук. думка, 1976. С. 27-30.

4. Кравец В. Г., Денисюк И. И. Амплитудно-частотный спектр импульса при действии взрыва в грунте. *Динамика уплотнения грунтового массива взрывом*. Киев : Наук. думка, 1979. С. 29-36.

5. Нагорный В. П., Денисюк И. И., Рудюк Я. А. Исследование циклического импульсного действия взрыва на горную породу с применением теории спектров. *Изв. вузов. Горн. журнал*. 2009. № 5. С. 85-88.

6. Нагорный В. П., Глоба В. М., Денисюк И. И. Взрывные работы при добыче природных углеводородов, строительстве магистральных трубопроводов и подземных хранилищ. Киев : Полиграфист, 2009. 330 с.

7. Яремійчук Р. С., Фем'як Я. М., Возный В. Р. Экспериментальное исследование энергии пульсирующих потоков для повышения эффективности разрушения горных пород при бурении скважин. *Технологии нефти и газа. Научно-технологический журнал*. 2008. № 4. С. 32-35.

4. Kravets V. H., Denysiuk Y. Y. Amplitudno-chastotnyi spektr impulsa pri deistvii vzryva v hrunte. *Dinamika uplotneniya hruntovoho mas-siva vzryvom*. Kiev : Nauk. dumka, 1979. P. 29-36.

5. Nahornui V. P., Denysiuk Y. Y., Rudiuk Ya. A.. Issledovanye tsyklycheskoho ympulsnoho deistvyia vzruva na hornuiu porodu s pryemenen-nyem teoryy spektrov. *Yzv. vuzov. Horn. zhurnal*. 2009. No 5. P. 85-88.

6. Nahornui V. P., Hloba V. M., Denysiuk Y. Y.. Vzryvnye raboty pri dobyche prirodnykh uhlevodorodov, stroitelstve mahistralnykh truboprovodov i podzemnykh khranilishch. Kiev: Polyhrafyst, 2009. 330 p.

7 Yaremychuk R. S., Femiak Ya. M., Voznyi V. R. Eksperymentalnoe yssledovanye enerhyy pulsuyushchykh potokov dlia povusheniya efektyvnosti razrusheniya hornukh porod pry burenyy skvazhyn. *Tekhnolohyy nefty y haza. Nauchno-tekhnolohycheskyi zhurnal*. 2008. No 4. P. 32-35.

References

1. Femiak Ya. M., Yaremiichuk R. S. Rozrobka optymalnykh rezhymiv kavitatsiinoho ruinuvannia hirs'kykh porid. *Naftova i hazova promyslovis't*. 2000. No 6. P. 13-15.

2. Drukovanui M. F. Metodu upravleniya vzryvom na karerakh. M. : Nedra, 1973. 416 p.

3. Denysiuk Y. Y. K voprosu otsenky parametrov vzrurnoho ympulsa s pomoshchiu eho spektralnykh kharakterystyk. *Yspolzovanye enerhyy vzruva na obektakh yrryhatyionnoho y melyoratyvnoho stroytelstva*. Kyev : Nauk. dumka, 1976. P. 27-30.