

FORECASTING OF CAVITATION MODES OF DRILLING MUD ON THE BASIS OF NONLINEAR OSCILLATIONS OF THE CAVITATION BUBBLE

ПРОГНОЗУВАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ТЕЧІЇ БУРОВОГО РОЗЧИНУ НА ОСНОВІ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ КАВІТАЦІЙНОГО ПУХИРЦЯ

Femiak Y. M. / Фем'як Я. М.

d.t.s., as.prof. / д.т.н., доц.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

Ivano-Frankivsk, St. Carpathian 15, 76019

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, 76019*

Анотація. В роботі розглядається прогнозування кавітаційних режимів течії бурового розчину з використанням математичної моделі нелінійних коливань кавітаційного пухирця, що дозволяє більш повно враховувати конструктивні особливості кавітаційних пристроїв, особливості фізичних процесів, які проходять на вибої свердловини, та враховують кавітаційно-пульсаційний режим подачі бурового розчину. Запропоновано інтегрально-диференціальне рівняння, що описує динаміку кавітаційного пухирця при дії амплітудно-частотного спектру хвиль тиску, які виникають унаслідок лускання пухирців в полі набігаючої хвилі заданої конфігурації.

Ключові слова: буровий розчин, кавітаційно-пульсаційний режим, кавітаційний пухирець.

Abstract. The paper considers the prediction of cavitation modes of drilling mud using a mathematical model of nonlinear oscillations of the cavitation bubble, which allows to more fully take into account the design features of cavitation devices, features of physical processes that take place at wellbore, and take into account the cavitation-pulsation drilling mud. An integral-differential equation is proposed that describes the dynamics of a cavitation bubble under the action of the amplitude-frequency spectrum of pressure waves, which arise due to the peeling of the bubbles in the field of the incident wave of a given configuration.

Key words: drilling mud, cavitation-pulsation mode, cavitation bubble.

Вступ.

Сьогодні деякі традиційні технології буріння досягли певної межі продуктивності. Разом з тим значним резервом підвищення ефективності руйнування гірської породи при бурінні, який не реалізується повною мірою, є енергія кавітаційно-пульсаційної дії потоку бурового розчину [1]. Проте для широкого впровадження в практику буріння кавітаційно-пульсаційної технології необхідно [2], по перше, розкрити та вивчити взаємодію механічних та фізичних процесів на вибої свердловини для визначення раціональних параметрів кавітаційно-пульсаційної дії на масив гірської породи при бурінні стандартними буровими долотами, що забезпечують інтенсифікацію процесу

руйнування гірської породи. По друге, необхідно вирішити проблему забезпечення такого кавітаційно-пульсаційного режиму на вибої, за якого зберігається стійкість параметра кавітації, що забезпечує утворення та ріст розмірів пухирців від зміни перепаду тиску та врахування густини бурового розчину, а також співвідношення розмірів насадок кавітаційного пристрою.

Основний текст.

Одним з основних способів вирішення даної проблеми є методи прогнозування різних параметрів кавітаційних режимів течії рідини на основі нелінійних коливань кавітаційного пухирця, що дозволяють більш повно враховувати конструктивні особливості кавітаційних пристроїв, особливості фізичних процесів, що відбуваються на вибої свердловини, та враховують кавітаційно-пульсаційний режим подачі бурового розчину.

Нами запропоновано інтегрально-диференціальне рівняння, що описує динаміку кавітаційного пухирця при дії амплітудно-частотного спектру хвиль тиску, які створюються внаслідок лускання пухирців в полі набігаючої хвилі заданої конфігурації [3]:

$$\dot{x} + g\dot{x} + \Omega_0^2 x = a \sin \omega_0 t, \quad (1)$$

де $a = -p_m / (\rho_0 R_0)$; $g = \Omega_0 / Q$;

Q - стійкість кавітаційного пухирця;

g - параметр демпфірування.

Загальний розв'язок диференціального рівняння (1) складається з двох розв'язків: загального розв'язку x_0 відповідного однорідного рівняння і часткового розв'язку x_1 рівняння (1):

$$x_0 = e^{-\frac{g\Omega_0 t}{2}} (c_1 \sin kt + c_2 \cos kt), \quad (2)$$

де c_1, c_2 - постійні інтегрування, що визначаються з початкових умов задачі;

$$k = \sqrt{\Omega_0^2 - \frac{\delta^2 \Omega_0^2}{4}}.$$

$$x_1 = A \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (3)$$

де параметри A і φ визначаються виразами:

$$A = \frac{a}{\sqrt{(\Omega_0^2 - \omega_0^2)^2 + (\omega_0 g)^2}}; \quad \varphi = -\arctg \frac{\omega_0 g}{\Omega_0^2 - \omega_0^2}. \quad (4)$$

Для прикладу, розглянемо нелінійні коливання кавітаційного пухирця радіусом $R_0 = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ при вихідних параметрах: $\rho_0 = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $p_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $p_m = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $\lambda = 4/3$; $\delta = 0,1$ ($Q = 10$).

Виходячи з прийнятих значень, в табл. 1 [3] наведені параметри для визначення пульсацій кавітаційного пухирця в полі набігаючої хвилі.

Таблиця 1

Параметри для визначення пульсацій кавітаційного пухирця

$\omega_0,$ $1/c$	$\Omega_0,$ $1/c$	$k,$ $1/c$	φ	ζ	$A, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	$A_1, \text{ м}$
<i>при $\Omega = 1$ (резонанс)</i>							
57140,8	57140,8	0,9	$-\pi/2$	-1,7	$8,75 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$
<i>при $\Omega = 1,25$</i>							
71415,6	57140,8	0,9	0,22	0,6	$-1,52 \cdot 10^{-4}$	$-2,32 \cdot 10^{-5}$	$4,02 \cdot 10^{-5}$

У випадку резонансу ($Q = 1$) пульсації кавітаційного пухирця, які зумовлені нелінійними ефектами, описуються залежністю:

$$x = 8,75 \cdot 10^{-4} \cos \bar{t} + 1,82 \cdot 10^{-3} \sin(2\bar{t} - 1,7) + 1,81 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

де $\bar{t} = \Omega_0 t$ - безрозмірний час.

При $\Omega = 1,25$, маємо:

$$x = -1,52 \cdot 10^{-4} \sin(1,25\bar{t} + 0,22) + 4,02 \cdot 10^{-5} \sin(2,5\bar{t} + 0,6) - 2,32 \cdot 10^{-5}. \quad (6)$$

Використавши формули (5, 6) на рис. 1 наведено графіки [3], які відображають нелінійні коливання кавітаційного пухирця в полі набігаючої хвилі для вище розглянутих умов.

З рис. 1 видно наступне: *крива 1* описує коливання середовища, викликані набігаючою хвилею $p_e = p_m \sin \omega_0 t$; *крива 2* відповідає резонансу $\Omega = 1$; *крива 3* описує зміщення середовища при початковій кавітаційно-пульсаційній дії $p_e = p_m \sin 1,25 \omega_0 t$; *крива 4* відображає нелінійні пульсації кавітаційного пухирця

при $\Omega = 1,25$.

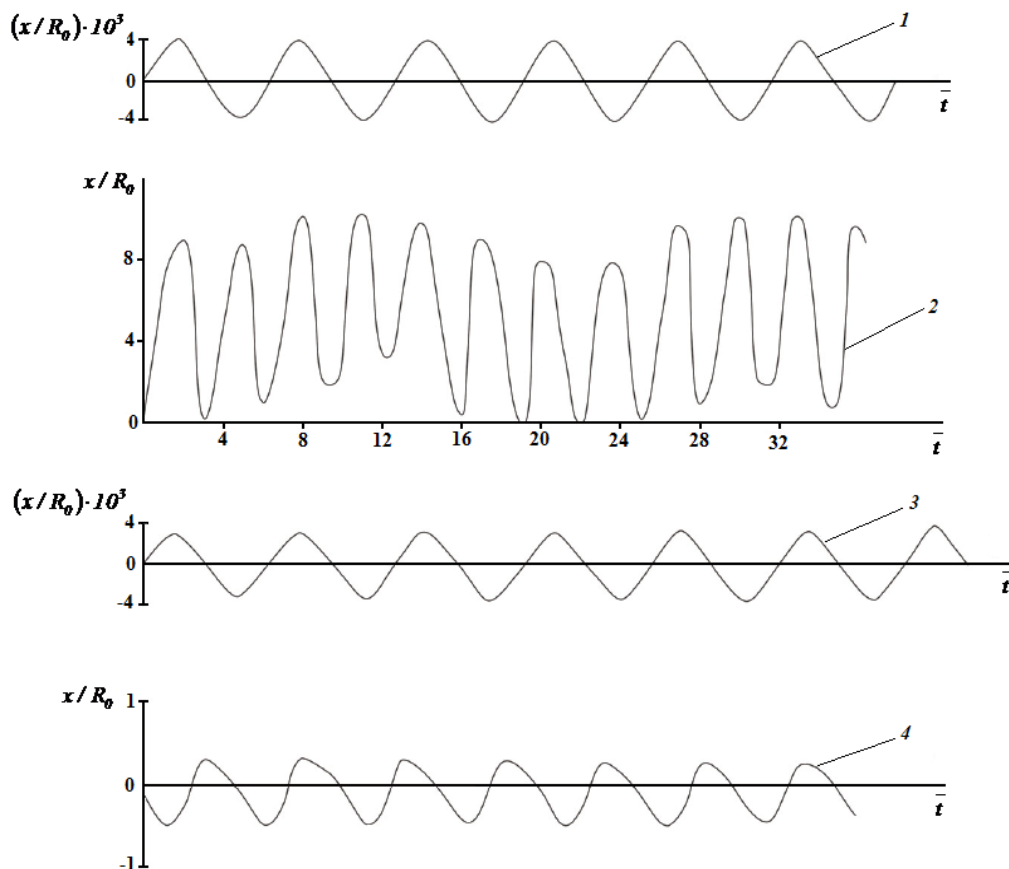


Рис. 1. Нелінійні коливання кавітаційного пухирця при різних режимах взаємодії з набігаючою хвилею

Аналіз коливань, представлених на рис. 1 (крива 2), показує, що у випадку появи резонансу, максимальні відносні амплітуди відхилень досягають значень порядку $x/R_0 = 10,3$. В абсолютних значеннях це складає $x = 3,605 \cdot 10^{-3}$ м (або 3,605 мм). Для коливань кавітаційного пухирця в полі набігаючої хвилі при $\Omega = 1,25$ (крива 4) максимальні відносні амплітуди пульсацій пухирця складають всього $x/R_0 = 0,497$, або $x = 1,74 \cdot 10^{-4}$ м в абсолютних значеннях.

Таким чином, ми змогли отримати частковий розв'язок (5) неоднорідного диференціального рівняння (1) з нелінійними членами, що описує коливання кавітаційного пухирця в полі набігаючої хвилі. Встановлено, що основний вклад в коливання пухирця вносять складові його руху, що спричинюються дією примусової сили.

Врахування нелінійних членів у рівнянні стану газу (повітря) в

кавітаційному пухирці дозволило отримати залежність амплітуди нелінійних коливань від частоти зовнішньої дії і власної частоти коливань кавітаційного пухирця, а також від стабільності свердловинного середовища, що визначає його дисипативні властивості. Встановлено, що при $\omega_0 = \Omega_0$, $\omega_0 = 0,5\Omega_0$ амплітуда нелінійних коливань має резонанси. В процесі коливань кавітаційного пухирця на цих частотах випромінюється максимум енергії, яка дисипуючи, призводить до руйнування гірської породи вибою свердловини. Таким чином, в процесі взаємодії набігаючої хвилі тиску з кавітаційним пухирцем в навколишньому середовищі свердловини (буровому розчині) виникають нелінійні коливання пухирця, максимумами амплітуди яких спостерігається на частотах, пов'язаних з власною частотою коливання пухирця. Коливання кавітаційного пухирця, через опір навколишнього середовища його руху (зона високого тиску), супроводжуються дисипацією енергії пухирця (лускання), що йде на руйнування породи.

Висновки.

Досліджено динаміку взаємодії нестационарної хвилі тиску з кавітаційним пухирцем газу (повітря), що знаходиться на ранньому етапі в рівноважному стані, із оточуючим його агресивним свердловинним середовищем.

На основі інтегрально-диференціального рівняння запропоновано формулу для визначення амплітудно-частотного спектру в залежності від параметрів середовища та набігаючої хвилі $p_e(t)$.

Результатами досліджень встановлено, що взаємодія набігаючої хвилі тиску з кавітаційним пухирцем, заповненим газом (повітрям), супроводжується випромінюванням хвиль в діапазоні частот від 10 до 104 кГц.

Утворені високочастотні хвилі, в свою чергу, взаємодіючи з буровим розчином формують в зоні роботи бурового долота пульсуючі струмені рідини, які різняться між собою по інтенсивності. В результаті зіткнення цих струминок з вибоєм свердловини виникають високі імпульси тисків, які інтенсивно діють на руйнування структури гірської породи.

Література:

1. Фем'як Я. М., Фем'як В. Я. Буріння свердловин з використанням кавітаційно-пульсаційного промивання їх вибоїв // Сборник научных трудов SWorld: международное периодическое научное издание. – Иваново: Научный мир, 2016. - Вып. 2(2). – Т. 5. - С. 36 – 40.
2. Фем'як Я. М. Кавітаційно-пульсаційні процеси в інструментах для буріння свердловин // International periodic scientific journal: Modern engineering and innovative technologies (Germany). 2018. Issue №3. Vol.1. P. 135-138.
3. Фем'як Я. М. Теорія та практика використання кавітаційних процесів при бурінні свердловин: дис. ... доктора техн. наук: 28.11.19 / Фем'як Ярослав Михайлович. – Івано-Франківськ, 2019. – 308 с.

*Стаття підготовлена в рамках дослідження
кавітаційних процесів при бурінні свердловин*

Стаття відправлена: 07.05.2020 р.

© Фем'як Я. М.