



УДК 681.5.03:681.5.075:681.518.2

**VOLUME ENERGY DENSITY MODEL AS AN INTEGRAL CONTROLLED ASSESSMENT OF THE PROPERTIES OF ROCKS AT THE BOREHOLE**  
**МОДЕЛЬ ОБ'ЄМНОЇ ГУСТИНИ ЕНЕРГІЇ ЯК ІНТЕГРАЛЬНОЇ КОНТРОЛЬОВАНОЇ**  
**ОЦІНКИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ВИБОЇ СВЕРДЛОВИНИ**

Mateik H./ Матеїк Г.Д.

0000-0003-0286-389X

Kuchmistenko O./Кучмистенко О.В.

0000-0002-0457-7611

Zvarych H. / Зварич Г.Г.

ORCID: 0000-0002-7866-542X

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,

Ivano-Frankivsk, Karpatskaya, 15,76019

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,76019

**Анотація.** Розглядається метод побудови інформаційної моделі контролю властивостей гірських порід в процесі поглиблення свердловини за допомогою такої інтегральної оцінки як об'ємна густина енергії.

**Ключові слова:** модель, контроль, гірські породи, об'ємна густина, механічна швидкість, проходка на долото.

**Вступ.**

Руйнування гірських порід буровим долотом на вибої свердловини є складним процесом, який відбувається за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта. Крім цього, цей процес є невідтворюваним, стохастичним, нелінійним, з елементами хаосу і розвивається в часі. Це викликає найбільші труднощі в математичній формалізації його опису. Особливі складнощі виникають при визначенні недетермінованих збурень: зносу оснащення долота, порушень досконалої промивки, зміни фізико-механічних і абразивних властивостей гірських порід та ін. Задача визначення властивостей гірських порід в процесі поглиблення свердловини ускладнюється ще й тим, що для опису цих властивостей використовується багато показників: густина, твердість, пористість, міцність, проникність, буримість, абразивність та ін., які можна оцінити лише в лабораторних умовах, що суттєво відрізняються від умов в свердловині. Тому вибір показника, за допомогою якого можна було б оцінювати властивості гірських порід в процесі поглиблення на вибої свердловини, є актуальною науково-практичною задачею.

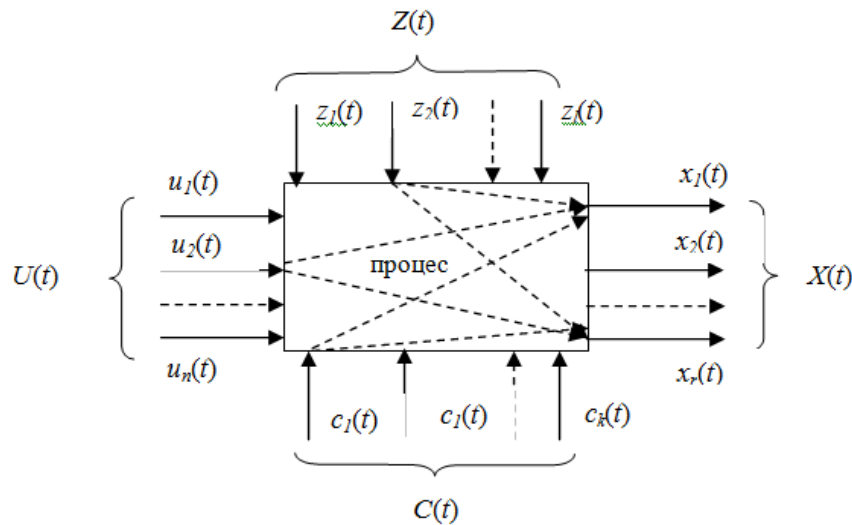
Аналіз літературних джерел (наприклад, [1,2,3 та ін.]) показує недостатній об'єм проведених досліджень в контексті використання інтегральних контрольованих оцінок властивостей гірських порід і їх моделей. Тому метою даної роботи є побудова моделі контролю властивостей гірських порід з врахуванням основних законів збереження і спрощенням механізму процесів руйнування порід на вибої свердловини.

**Виклад основного матеріалу.**

Фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід є головним видом недетермінованих збурень, що впливають на ефективність процесу буріння



нафтових і газових свердловин. Буріння свердловини прийнято [2÷58] розглядати як багатомірний технологічний процес, структура моделі “вхід–вихід” якого наведена на рис.1.



**Рис. 1 Структура моделі “вхід–вихід” для процесу буріння свердловин**

Джерело [2]

Можна виділити чотири групи змінних, що характеризують процес.

До першої групи змінних  $U(t)$ , що діють на вході керованого об'єкта, відносять такі керовані дії як осьова сила  $F(t)$  на долото, швидкість обертання долота  $n(t)$ , витрата бурового розчину  $Q(t)$  та його характеристики (густина  $\rho$ , в'язкість  $\nu$ , водневий показник  $pH$ , вміст піску, швидкість витікання з насадок долота).

Некеровані параметри  $C(t)$ , які не залежать від режиму буріння (тип долота і його діаметр  $D$ , кількість шарошок, геометрія зубів, глибина свердловини, параметри колони бурильних труб і бурової установки) відносять до другої групи змінних.

До третьої групи відносять показники процесу буріння  $X(t)$ : механічну швидкість буріння  $v(t)$ , проходку на долото  $h(t)$ , рейсову швидкість буріння  $v_p(t)$ , зношення оснащення  $\mu(t)$  і опір долота  $g(t)$  та ін.

Четверту групу складають збурюючі впливи  $Z(t)$ : сила статичного опору тертя колони бурильних труб об стінки свердловини, пластові тиски, фізико-механічні та абразивні властивості порід вибою свердловини (контактна міцність, пластичність, абразивність, густина, твердість, пористість, прикипність та ін.).

Параметри режиму буріння  $F(t)$ ,  $n(t)$ ,  $Q(t)$  є компонентами вектора вхідних керувальних дій

$$U(t) = U(F(t), n(t), Q(t)), \quad (1)$$

а показники процесу  $h(t)$ ,  $\mu(t)$ ,  $g(t)$  та ін. є компонентами вектора  $X(t)$  вихідних змінних.

$$X(t) = X(h(t), \mu(t), g(t)). \quad (2)$$

При постійних властивостях розбурюваних порід одержана велика кількість моделей, які зв'язують  $X(t)$  і  $U(t)$ . Вони можуть бути записані у формі рівняння “вхід-вихід”.



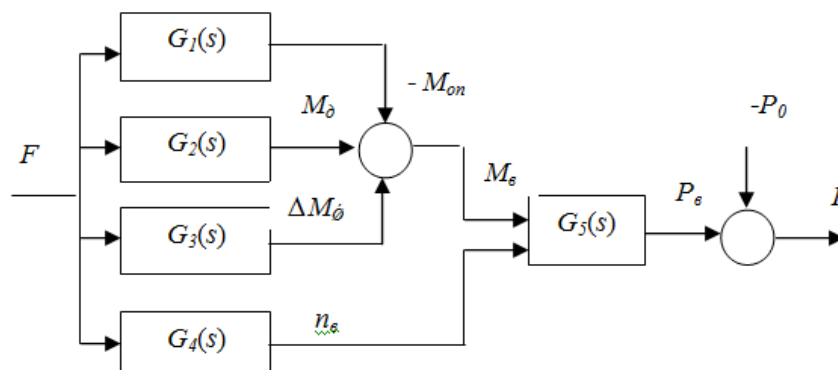
$$\Phi(F(t), n(t), Q(t); h(t), \mu(t), g(t)) = 0. \quad (3)$$

Аналіз рівнянь, запропонованих різними авторами, показує, що в кожне з них входить функція зношення оснащення долота. Недостатня вивченість взаємозв'язків зношення долота з фізико-механічними і абразивними властивостями гірських порід призвели до того, що математичні моделі процесу поглиблення свердловин мають вузьку область застосування. Відсутність методів і засобів інформації про властивості порід і про технічний стан долота в процесі роботи не дозволяє глибоко вивчити цей процес. У той же час емпіричні залежності, одержані на базі статистичної обробки даних, неточні внаслідок комплексного впливу керувальних дій і фізико-механічних властивостей породи. Однак, оскільки в цей же час практичний інтерес представляють інтегральні оцінки властивостей гірських порід, то головна увага приділяється вивченню цих зв'язків.

На початку скористаємося очевидним твердженням, що енергія  $W$ , яка підводиться із зовні до породоруйнівного інструменту, дорівнює сумі витрат енергії на руйнування породи на вибої свердловини  $W_1$ , на просування інструменту  $W_2$  і на тепло  $W_T$  за рахунок сил тертя при розтиранні породи, тобто

$$W = W_1 + W_2 + W_T. \quad (4)$$

Що стосується потужності, яка витрачається на поглиблення свердловини, то вона формується під впливом сили  $F(t)$ , яка діє на долото. Схема формування потужності, яка витрачається на поглиблення свердловини з урахуванням зношення діаметру долота наведена на рис. 2.



**Рис. 2 – Структурна схема формування потужності  $P$  на поглиблення свердловини:  $P_0$  – потужність неробочого ходу;  $P_\epsilon$ ,  $M_\epsilon$  – потужність і момент на валі приводу долота;  $M_{on}$  – момент опору, який створюють опори долота;  $M_\delta$  – момент двигуна;  $M_\theta$  – зменшення моменту опору у зв'язку із зносом долота за діаметром;  $n_\delta$  – швидкість обертання двигуна;  $G_1(s)$ ,  $G_2(s)$ ,  $G_3(s)$ ,  $G_4(s)$ ,  $G_5(s)$  – функції передачі**

Джерело [3]

Ця потужність дорівнює сумі двох потужностей:  $P_1$  – потужності, яка витрачається на обертання долота, і  $P_2$  – потужності, яка витрачається на поглиблення вибою свердловини [4,5].

Частка потужності  $P_1$ , в залежності від конструкції породоруйнівного інструменту і його технічного стану, а також властивості породи, витрачається



на подолання сил тертя і перетирання породи. Ця частка потужності перетворюється в тепло, а решта витрачається на механічну роботу по руйнуванню породи на вибої свердловини. Для визначення потужності  $P_l^*$ , яка витрачається на руйнування породи, в [5] запропоновано використати поняття коефіцієнта корисної дії породоруйнівного інструменту  $\eta$ , який визначається наступним чином.

Якщо не враховувати залежність потужності  $P_c$  від властивостей бурового розчину, тобто вважати параметри бурового розчину протягом одного рейсу долота сталими, то потужність  $P_c$  є функцією об'ємної густини енергії  $w$  і об'єму пробуреної свердловини в одиницю часу

$$\frac{v\pi D^2}{4}, \quad (5)$$

де  $D$  – діаметр долота

Згідно теорії розмірності [5] величини  $w$ ,  $P_c$  і  $\frac{v\pi D^2}{4} = 0,785vD^2$  повинні задовільняти рівнянню

$$f(w, P_c, 0,785vD^2) = 0, \quad (6)$$

яке в безрозмірних змінних приводиться до вигляду

$$f(\Pi) = 0, \quad \Pi = \frac{P_c}{wvD^2}. \quad (7)$$

Що стосується потужності  $P_n$ , яка витрачається на повторне перетирання породи, то вона залежить від об'єму породи, який вибурюється в одиницю часу, витрати бурового розчину  $Q$  і його властивостей, середнього розміру частинок шламу, об'ємної густини енергії  $w$  та ін.

Така велика кількість параметрів не дає змогу отримати простий параметричний ряд для потужності  $P_n$  методом теорії розмірностей. Тому для розкриття потужності  $P_n$  скористаємося емпіричною формулою [5]:

$$P_n = kD^2 \frac{v}{Q}, \quad (8)$$

де  $k$  – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від фізико-механічних властивостей породи, властивостей бурового розчину і особливостей його подачі на вибій свердловини.

Якщо прирівняти складові потужності  $P$  і суму потужностей  $P_c$  і  $P_n$ , то отримаємо

$$\eta P_l + Fv = wcvD^2 + \frac{wckv^2 D^4}{Q}. \quad (9)$$

З рівняння (9) отримаємо вираз для об'ємної густини енергії

$$w = \frac{\eta P_l + Fv}{cvD^2 \left( 1 + k \frac{vD^2}{Q} \right)}. \quad (10)$$

Розмірність чисельника рівняння (10) [кВт].

Потужність  $P_l$ , яка потрібна для обертання долота, зв'язана з швидкістю обертання  $n$  співвідношенням



$$P_1 = \frac{Mn}{975}, \quad (11)$$

де  $M$  – момент на долоті.

Тоді модель (10) можна переписати у такому вигляді

$$w = \frac{0,001\eta \cdot Mn + Fv}{cvD^2 \left(1 + k \frac{vD^2}{Q}\right)}, \quad \left[ \frac{\kappa Bm - \text{год}}{m^3} \right]. \quad (12)$$

Проте, для того, щоб розрахувати об'ємну густину енергії  $w$ , необхідно знати коефіцієнт  $k$ , який залежить від властивостей бурового розчину, а також коефіцієнт корисної дії породоруйнівного інструменту  $\eta$ , який залежить від умов буріння, зношення опор і оснащення долота і змінюється в часі. Для шарошкових доліт [3]

$$\eta \approx 0,1 \div 0,15,$$

а для алмазних

$$\eta_a \approx 0,01 \div 0,02.$$

Враховуючи фактичні витрати електроенергії на поглиблення свердловини, встановлено [4,5], що числове значення виразу  $\left(1 + k \frac{vD^2}{Q}\right) = 7,9$ .

Тоді безрозмірний вираз  $c \left(1 + k \frac{vD^2}{Q}\right)$  в знаменнику виразу (12) дорівнює 0,79. При збільшенні потужності  $P$  значення цього виразу наближається до одиниці.

Отже модель (12) можна переписати у такому вигляді:

$$w = \frac{0,001\eta Mn + Fv}{vD^2}, \quad (\text{кВт} \cdot \text{год})/\text{м}^3. \quad (13)$$

Якщо ж не подавати буровий розчин в свердловину ( $Q = 0$ ), то, виходячи з аналізу процесу буріння, параметр  $w$  повинен також дорівнювати нулю, незалежно від швидкості обертання долота і осьової сили. Такий же результат отримуємо з моделі (12).

Об'ємна густина енергії інформативно зв'язана з такими властивостями гірських порід як густина, пористість, проникність, твердість, буримість [3,5] і зростає із збільшенням глибини  $H$  свердловини і зносу долота. Типовий графік залежності  $w(H)$  наведено на рис. 3

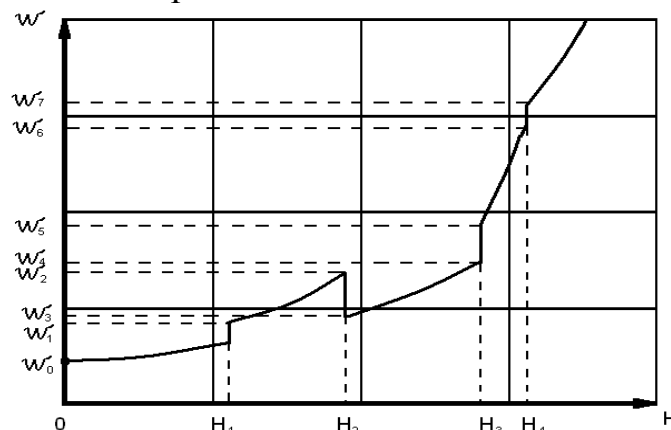


Рис. 3 - Графік залежності  $w = f(H)$

Джерело [5]



Якщо ця тенденція порушується у бік зменшення показника  $w$ , то це свідчить про вхід долота в зону з аномально-високим пластовим тиском ( $H_2 \div H_3$ ).

Контроль об'ємної густини енергії  $w$  сприяє розв'язанню таких важливих геолого-технологічних задач як виявлення меж пластів гірських порід, визначення колекторських властивостей пластів, оцінка ефективності роботи доліт, оптимізація процесу буріння за критерієм

$$w(x) \xrightarrow{x \in S} \min, \quad (14)$$

$$\text{де } S = \left\{ (F_i, n_i)_{i=1, \dots, N}; F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}; n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}; \sum_{i=1}^N h_i = H; h_i > 0 \right\};$$

$F_i, n_i$  – сила, що діє на долото і швидкість його обертання у  $i$ -му рейсі.

Перехід долота із одного пласта в інший супроводжується ступінчатою зміною показника  $w$ , яка викликана неоднорідністю геологічного розрізу по енергоємності гірських порід. На межі розділу порід з різними властивостями виконується така умова:

$$K_w > 1 \cup K_w < 1, \quad (15)$$

$$\text{де } K_w = \frac{w_2}{w_1} = \frac{\frac{P_2}{V_2}}{\frac{P_1}{V_1}} = \frac{\frac{\Delta h_2 / \Delta t}{V_2}}{\frac{\Delta h_1 / \Delta t}{V_1}},$$

яка дає змогу розбити геологічний розріз за об'ємною густиною енергії.

Якщо  $K_w > 1$ , то це означає, що долото перейшло в породу з більшою об'ємною густиною енергії. Якщо  $K_w < 1$ , то це означає що долото перейшло в породу з меншою об'ємною густиною енергії.

### Висновок.

Розроблено модель об'ємної густини енергії як інтегральної контрольованої оцінки властивостей гірських порід на вибої свердловини, яка може бути використана для контролю питомих витрат енергії на поглиблення свердловин, що дає змогу оцінювати властивості порід в реальному часі і здійснювати онлайн-моніторинг витрат енергії на буріння нафтових і газових свердловин.

### Література:

1. Матеїк Г.Д. Оцінки статистичних характеристик флуктуацій осьової сили на бурове долото в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів ІФНТУНГ Інститут інформаційних технологій. 8 жовтня, м. Івано-Франківськ - 2020. С. 23-25

2. Семенцов Г.Н., Когуч Я.Р. Автоматизований контроль меж пластів гірських порід в процесі буріння свердловин на нафту і газ. Навчальний посібник.– Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2010.– 175 с.

3. Семенцов Г.Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных скважин и газовых скважин. Автореф.дис...докт.техн.наук 05.13.07 / Московский институт нефти и газа им. И.М.Губкана.– Москва, 1990.– 44с.





4. Семенцов Г.Н. Автоматизація процесу буріння свердловин. Навчальний посібник.– Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2010.– 300 с.

5. Семенцов Г.Н., Кузь Т.Я. Теоретичні основи методу контролю твердості порід при поглибленні свердловини // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ, №37(6) .– 2001.– С.93-98.

***Abstract.** The method of building an information model for controlling the properties of rocks in the process of deepening a well using such an integral assessment as volumetric energy density is considered.*

***Key words:** model, control, rocks, bulk density, mechanical speed, bit penetration.*

Стаття відправлена: 17.09.2022 р.

© Матеїк Г.Д., Кучмистенко О.В., Зварич Г.Г.