



УДК 681.513.5:622.24.205.055

ANALYSIS OF OPTIMALITY CRITERIA FOR THE DRILLING PROCESS OF OIL AND GAS WELLS WITH PDC BIT TYPE

АНАЛІЗ КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДОЛОТАМИ ТИПУ PDC

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. У роботі розглядається вплив функції зносу озброєння доліт типу PDC на проходку долота, механічну швидкість проходки, рейсову швидкість і собівартість метра проходки нафтових і газових свердловин. На базі аналізу необхідних умов існування екстремумів цих критеріїв показано, що для доліт типу PDC всі оптимальні режими збігаються.

Ключові слова: критерії оптимальності, рейсова швидкість, процес буріння, проходки долота, долото типу PDC.

Вступ. Алгоритм оптимального керування процесом буріння, побудований на базі математичної моделі керованого об'єкта, передбачає наявність критерію оптимальності. Для буріння нафтових і газових свердловин традиційними шарошковими долотами основними критеріями оптимальності є критерій собівартості метра проходки, максимуму проходки на долото та критерій максимуму рейсової швидкості, які досліджені досить глибоко [1,2].

Слід зазначити, що на даний час співвідношення між обсягами буріння традиційними шарошковими і сучасними долотами типу PDC (Polycrystalline Diamond Cutter) становить приблизно 75% і 25% відповідно. Проте, найближчим часом становитиме 50% на 50% [1]. Це викликано тим, що конструкція цього типу доліт забезпечує тривалий ресурс експлуатації і великі швидкості буріння за рахунок високої зносостійкості ріжучих елементів PDC-різців, відсутність підшипникової опори, що підвищує проходку на долото і суттєво зменшує кількість опускально-підймальних операцій. Окрім того, незначний вплив динаміки роботи долота на вибій свердловини і колону бурильних труб та висока



зносостійкість різців колібруючої поверхні виключають необхідність проробки і колібрування стовбура свердловини перед опусканням обсадної колони [1-3].

Питання аналізу впливу зношування оснащення доліт типу PDC на оптимальні значення керувальних дій є актуальним науковим і прикладним завданням у зв'язку з широким застосуванням в бурінні комп'ютерно-інтегрованих технологій і збільшенням обсягів пошуково-розвідувального буріння.

Основний текст. Метою даної роботи є аналіз впливу функції зношування оснащення доліт типу PDC на відомі критерії оптимальності процесу буріння нафтових і газових свердловин. Виходитимемо з того, що у процесі буріння свердловин різної глибини і призначення традиційними шарошковими долотами керувальні дії, що є оптимальними за якимось одним чинником, не є оптимальними за іншим, тобто екстремуми їх не збігаються.

Наприклад, максимум механічної швидкості проходки не збігається з максимумом проходки долота; мінімум собівартості метра проходки свердловини не відповідає максимуму рейсової швидкості [2], навпаки, максимум проходки долота співпадає з мінімумом питомих витрат електроенергії. Тому запропоновано було із збільшенням глибини свердловини для буріння традиційними шарошковими долотами по чергово використовувати критерії оптимальності в певній послідовності за таким правилом:

$$P: V_p(x) \xrightarrow{x \in S} \max; c(x) \xrightarrow{x \in S} \min; P: h_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max, \quad (1)$$

де $S = \left\{ (F_i n_i)_{i=1,2,\dots,N}; F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}; n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}; \sum_{i=1}^N h_i = H; h_i > 0 \right\}$, V_p – рейсова швидкість буріння; c – собівартість метра проходки; F_i , n_i – осьова сила на долото і швидкість його обертання у i -му рейсі; N – кількість рейсів долота; h_i – проходка на долото в i -му рейсі; H – проектна глибина свердловини.

Для вибору критеріїв оптимальності у відповідності з правилом (1) було сформульовано спеціальне Т-правило [3]. Проте, усі критерії оптимальності процесу буріння $I(h(t), t)$, де $h(t)$ – проходка на долото, t – час буріння, залежать або від функції зношування долота, або від похідної функції зношування.



Наприклад, такий інтегральний показник, як проходка долота може бути виражена наступним чином

$$h(\bar{U}, t) = V_0(\bar{U}) \varphi(\bar{U}, t), \quad (2)$$

де $\bar{U}^T = (F, n)$ - вектор керувальних дій, $V_0(\bar{U})$ - початкове значення механічної швидкості проходки незатупленим долотом, $\varphi(\bar{U}, t)$ - функція зношування оснащення долота, яка дорівнює відношенню початкової механічної швидкості проходки до початкового значення механічної швидкості проходки $\varphi = V/V_0$.

Тоді механічна швидкість проходки дорівнює [3]:

$$\frac{dh}{dt} = V(\bar{U}, t) = V_0(\bar{U}) \frac{d\varphi(\bar{U}, t)}{dt}. \quad (3)$$

У процесі буріння долотом типу PDC, що не затуплюється, оцінка математичного сподівання механічної швидкості проходки не змінюється в часі, тобто

$$V = V(\bar{U}), \quad (4)$$

а функція зношування є часом $T_{\text{вд}}$ відпрацювання долота

$$\varphi(\bar{U}, t) = T_{\text{вд}}(\bar{U}). \quad (5)$$

Оскільки можна підібрати деяке значення часу T , протягом якого відбувається процес буріння в однорідних за міцністю породах, а саме $|0 < T < \infty|$, і для якого виконується умова:

$$\int_{t_2 - \frac{T}{2}}^{t_2 + \frac{T}{2}} V(\tau) d\tau = \text{const}, \quad (6)$$

то такий режим буріння є усталеним (рис.1).

Отже в усталеному режимі буріння постійним є математичне сподівання механічної швидкості проходки на інтервалі часу тривалістю T , який відповідає бурінню з постійними керувальними діями в породах однакової міцності. Такий режим роботи є стаціонарним, або статичним, що дає змогу використовувати для його оптимізації статичні методи оптимального керування.

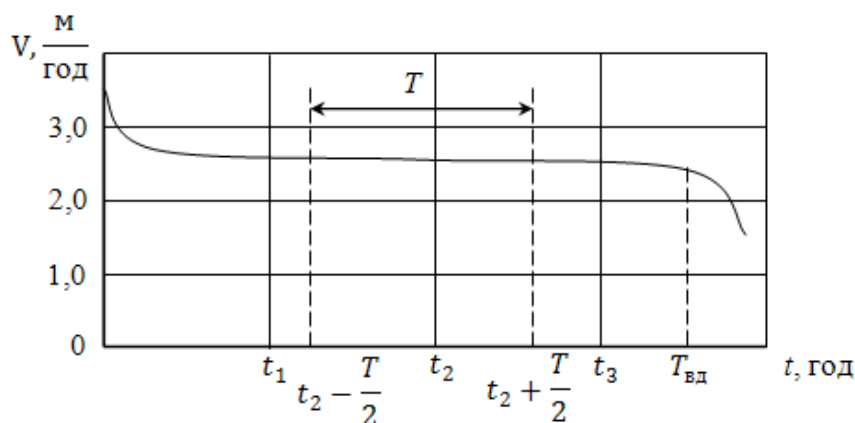


Рисунок 1 – Графік зміни оцінки математичного сподівання механічної швидкості проходки в часі

Джерело: [1]

Зважаючи на (5), проходка на долото типу PDC дорівнюватиме:

$$h_{\bar{a}} = V(\bar{U}) \cdot T_{\bar{a}\bar{a}}(\bar{U}) \quad (7)$$

Для ілюстрації того, що екстремуми функцій (2) і (3) збігаються під час буріння долотами типу PDC, визначимо необхідні умови максимуму механічної швидкості проходки.

$$\frac{\partial V(\bar{U})}{\partial F} = 0, \quad \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial n} = 0, \quad (8)$$

і максимуму проходки на долото

$$\frac{\partial h_{\bar{a}}}{\partial F} = 0, \quad \frac{\partial h_{\bar{a}}}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

Після підстановки в систему рівнянь (9) виразу (7), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(V(\bar{U}) \cdot T_{\bar{a}\bar{a}}(\bar{U}))}{\partial F} &= \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial F} T_{\bar{a}\bar{a}}(\bar{U}) + V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\bar{a}\bar{a}}(\bar{U})}{\partial F} = 0, \\ \frac{\partial(V(\bar{U}) \cdot T_{\bar{a}\bar{a}}(\bar{U}))}{\partial n} &= \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial n} T_{\bar{a}\bar{a}}(\bar{U}) + V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\bar{a}\bar{a}}(\bar{U})}{\partial n} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Аналіз систем рівнянь (8) і (10) свідчить, що їх розв'язки ніколи не збігаються, оскільки, в системі рівнянь (10) наявна похідна від функції зношування, яка в процесі буріння традиційними шарошковими долотами весь час змінюється. Проте, оскільки для доліт нового покоління, що не



затуплюються зокрема типу PDC, функція зношування постійна, то складові рівнянь системи (10) дорівнюють $V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\text{aa}}(\bar{U})}{\partial F} = 0$ з $V(\bar{U}) \frac{\partial T_{\text{aa}}(\bar{U})}{\partial n} = 0$. Тоді система рівнянь (10) набуде такого вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial F} T_{\text{aa}}(\bar{U}) &= 0, \\ \frac{\partial V(\bar{U})}{\partial n} T_{\text{aa}}(\bar{U}) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Отже, порівнявши системи рівнянь (11) і (8), бачимо, що екстремуми механічної швидкості проходки і проходки на долото типу PDC збігаються. Це означає, що керування процесом буріння можна здійснювати на базі критеріїв [3]:

$$h_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max \vee V_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max. \quad (12)$$

Тепер розглянемо показник рейсової швидкості проходки долотами типу PDC

$$V_p = \frac{h}{t_{\text{a}} + t_{\text{нп}}}, \quad (13)$$

де t_6 – час чистого буріння; $t_{\text{спо}}$ – час, що витрачається на спуско-підймальні операції.

Враховуючи, що $h = V \cdot T_{\text{вд}}$ і $t_6 = T_{\text{вд}}$, отримаємо

$$V_p = \frac{V \cdot T_{\text{aa}}}{T_{\text{aa}} + t_{\text{нп}}}, \quad (14)$$

тобто рейсова швидкість проходки долотами типу PDC залежить від механічної швидкості проходки $V(\bar{U})$ і функції зношування долота $T_{\text{aa}}(\bar{U})$.

Необхідні умови існування екстремуму рейсової швидкості проходки

$$\frac{\partial V_p(\bar{U})}{\partial F} = 0, \quad \frac{\partial V_p(\bar{U})}{\partial n} = 0 \quad (15)$$

у цьому випадку дають таку систему рівнянь [2]:



$$\begin{aligned} (T_{\text{aa}}^2 + T_{\text{aa}} \cdot t_{\text{nn}}) \frac{\partial V}{\partial F} + V \cdot t_{\text{nn}} \frac{\partial T_{\text{aa}}}{\partial F} &= 0, \\ (T_{\text{aa}}^2 + T_{\text{aa}} \cdot t_{\text{nn}}) \frac{\partial V}{\partial n} + V \cdot t_{\text{nn}} \frac{\partial T_{\text{aa}}}{\partial n} &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Для незатупленого долота типу PDC відсутність зношування оснащення означає, що $T_{\text{вд}} = \text{const}$. Тоді

$$V t_{\text{nn}} \frac{\partial T_{\text{aa}}}{\partial F} = 0 \text{ і } V t_{\text{nn}} \frac{\partial T_{\text{aa}}}{\partial n} = 0$$

і розв'язок системи рівнянь (16) збігається з розв'язками систем (8) і (10).

Отже, максимум рейсової швидкості проходки у процесі буріння долотами типу PDC збігається з максимумами механічної швидкості проходки і проходки на долото. Окрім того, розглянемо критерій собівартості метра проходки

$$C = \frac{B_{\text{г}} (T_{\text{вд}} + t_{\text{спо}}) + B_{\text{д}}}{h}, \quad (17)$$

де $B_{\text{г}}$ – вартість однієї години роботи бурової установки без урахування вартості долота; $B_{\text{д}}$ – вартість долота.

Умови існування мінімуму собівартості метра проходки свердловини долотом типу PDC дають таку систему рівнянь [3]:

$$\begin{aligned} T_{\text{aa}} (T_{\text{aa}} B_{\text{a}} + t_{\text{nn}} B_{\text{a}} + B_{\text{a}}) \frac{\partial V}{\partial F} &= -(B_{\text{a}} t_{\text{nn}} + B_{\text{a}}) \frac{\partial T_{\text{aa}}}{\partial F}, \\ T_{\text{aa}} (T_{\text{aa}} B_{\text{a}} + t_{\text{nn}} B_{\text{a}} + B_{\text{a}}) \frac{\partial V}{\partial n} &= -(B_{\text{a}} t_{\text{nn}} + B_{\text{a}}) \frac{\partial T_{\text{aa}}}{\partial n}. \end{aligned} \quad (18)$$

Очевидно, що для незатупленого долота типу PDC відсутність зношування оснащення означає, що функція зношування не змінюється, і праві частини системи рівнянь (18) дорівнюють нулеві. Тоді система рівнянь (18) набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} T_{\text{aa}} (T_{\text{aa}} B_{\text{a}} + t_{\text{nn}} B_{\text{a}} + B_{\text{a}}) \frac{\partial V}{\partial F} &= 0, \\ T_{\text{aa}} (T_{\text{aa}} B_{\text{a}} + t_{\text{nn}} B_{\text{a}} + B_{\text{a}}) \frac{\partial V}{\partial n} &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Бачимо, що розв'язок системи рівнянь (19) збігається з розв'язком систем



(8), (10) і (16). Отже за відсутності зношування долота усі оптимальні режими буріння збігаються. Це означає, що статична оптимізація процесу буріння свердловини долотами типу PDC може бути реалізована на базі одного із критеріїв

$$h_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max \vee V_i(x) \xrightarrow{x \in S} \max \vee V_p(x) \xrightarrow{x \in S} \max \vee C(x) \xrightarrow{x \in S} \min, x \in S, \quad (20)$$

які є мультиколінеарними.

Якщо ж функція зношування долота не є постійною величиною, тобто спостерігається зношування долота (що відбувається під час використання шарошкових доліт), то тоді значення екстремумів проходки, механічної швидкості проходки, рейсової швидкості і собівартості метра проходки не співпадають.

Проте, якщо поділити перше рівняння системи (18) на друге і, таку ж процедуру виконати для систем рівнянь (8), (10) і (16), то отримаємо рівняння:

$$\frac{\partial V}{\partial F} \frac{\partial T_{aa}}{\partial n} - \frac{\partial T_{aa}}{\partial F} \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \quad (21)$$

яке рівняння в площині параметрів F і n зображає деяку лінію, на якій розташовані усі оптимальні режими буріння.

Висновок.

Було проаналізовано критерії оптимальності процесу буріння нафтових і газових свердловин долотами типу PDC, які довели, що за умови відсутності зношування оснащення долота усі оптимальні режими буріння збігаються. Це означає, що статична оптимізація процесу буріння нафтових і газових свердловин долотами типу PDC може бути реалізована на базі будь-якого критерію оптимальності: максимуму проходки на долото, максимуму механічної швидкості проходки, максимуму рейсової швидкості проходки, оскільки усі вони мультиколінеарні. Перевагу слід надати максимуму механічної швидкості проходки.



Література:

1. Драганчук О.Т. Аналіз відпрацювання доліт PDC на родовищах України і світу / О. Т. Драганчук, Т. О. Пригоровська // Нафтогазова енергетика. – 2008. - №4. – С.11-15.
2. Чигур Л.Я. Удосконалення структури системи підтримки прийняття рішень для контролю технічного стану породоруйнівного інструменту / Л. Я. Чигур // Науковий вісник національного лісотехнічного університету України. - 2015. – Вип. 25.9. – С. 250-255.
3. Чигур Л.Я. Контроль технічного стану алмазних доліт за умов апріорної та поточної невизначеності процесу буріння / Л. Я. Чигур // Materiały X międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji “Europejska nauka XXI wieku - 2014”. v.32 - Przemysł: Nauka i studia. – 2014 - S. 27-32.

Abstract. *The paper considers the issue of increasing the efficiency of the drilling process of oil and gas wells using PDC bits. The main optimality criteria that determine the quality and efficiency of the drilling process are analyzed, in particular: mechanical passage speed, bit wear resistance, energy consumption and stability of operating modes. Special attention is paid to the relationship between the design parameters of PDC bits and their operating conditions in various geological and technical environments. The advantages of using modern tools of this type compared to traditional bits are determined, and the factors that most affect the efficiency of the drilling process are identified. The results obtained can be used to optimize the choice of drilling tools and operating modes, which will contribute to increasing productivity and reducing the cost of drilling wells.*

Key words: *optimality criteria, cruising speed, drilling process, bit penetration, PDC type bit.*

Стаття відправлена: 18.09.2025 г.

© Зварич Г. Г.