
Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 681.518:622:24

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ КЕРУВАЛЬНИХ ДІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ВІДПРАЦЮВАННЯМ ДОЛІТ

Л.Я. Чигур

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067,
e-mail: kafatp@ukr.net*

Розглядаються теоретичні і прикладні аспекти автоматизації процесу керування відпрацюванням бурових доліт нового покоління – шарошкових і типу PDC. Конструкція сучасних доліт типу PDC забезпечує тривалий ресурс експлуатації за рахунок високої зносостійкості ріжучих елементів PDC-різців та відсутності підшипникової опори.

На основі системного підходу проведено аналіз сучасних методів визначення ефективних керувальних дій за спрощеними статичними регулярними критеріями оптимізації процесу буріння як складного об'єкта, що функціонує під впливом завад за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури і параметрів об'єкта. Показано, що між такими керувальними діями, як осьова сила на долото і частота його обертання існує функціональна залежність, яку слід враховувати для автоматизації процесу керування відпрацюванням доліт. При цьому слід враховувати і характер зміни осевої сили на долото в часі.

Результати аналізу дали підстави зробити оцінку розглянутих критеріїв, виявити недоліки. Пропонується для визначення оптимальних керувальних дій використовувати додатково математичну модель взаємозв'язку швидкості обертання долота з осевою силою на долото.

Ключові слова: бурові долота, керувальні дії, критерії оптимізації, математична модель, осьова сила на долото, автоматизація процесу керування.

Рассматриваются теоретические и прикладные аспекты автоматизации процесса управления отработкой буровых долот нового поколения – шарошечных и типа PDC. Конструкция современных долот типа PDC обеспечивает длительный ресурс эксплуатации за счет высокой износостойкости режущих элементов PDC-резцов и отсутствия подшипниковой опоры.

На основе системного подхода проведен анализ современных методов определения эффективных управляющих действий по упрощенным статическим регулярным критериям оптимизации процесса бурения как сложного объекта, функционирующего под воздействием помех в условиях априорной и текущей неопределенности относительно структуры и параметров объекта. Показано, что между такими управляющими действиями, как осевая сила на долото и частота его вращения существует функциональная зависимость, которую необходимо учитывать для автоматизации процесса управления отработкой долот. При этом следует учитывать и характер изменения осевой силы на долото во времени.

Результаты анализа позволили произвести оценку рассматриваемых критериев, выявить недостатки. Предлагается для определения оптимальных управляющих действий использовать дополнительно математическую модель взаимосвязи скорости вращения долота с осевой силой на долото.

Ключевые слова: буровые долота, управляющие действия, критерии оптимизации, математическая модель, осевая сила на долото, автоматизация процесса управления.

In this article we deal with theoretical and applied aspects of control process automation of the new generation of drilling bits – rolling cutter bits and PDC. The design of modern bits such as PDC provides for long-term operation due to high wear resistance of PDC cutting elements with no bearing assembly.

Based on systematic approach, there has been conducted an analysis of modern test methods of effective controlling actions in a simple static regular optimization criteria for complex drilling that functions under the

influence of drawbacks in the context of prior and ongoing uncertainty of its structure and parameters. It is shown that there is a functional relation between such controlling actions as axial force applied to the bit and its rotation frequency, relation that should be considered while drilling bits control process automation. Besides, the bit applied axial force time behavior should also be taken into account.

The analysis results enabled evaluation of the criteria mentioned, identification of gaps and, in order to determine optimal controlling actions, proposition of an additional mathematical model of interrelation between bit's rotating speed and axial force applied to it.

Keywords: drilling bits, controlling actions, optimization criteria, mathematical model, axial force, control process automation.

Вступ. Удосконалення і дослідження критеріїв відпрацювання доліт є актуальним науково-прикладним завданням у зв'язку з інтенсивним впровадженням в нафтогазовій галузі промисловості бурових доліт нового покоління (шарошкових і алмазних типу PDC) з проходкою на одне долото до 6000 м, а також комп'ютерно-інтегрованих технологій керування [1, 2, 9].

II Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системний підхід до вирішення завдання ефективного керування процесом буріння нафтових і газових свердловин нерозривно пов'язаний з вибором і оцінкою ефективності критеріїв оптимізації цього складного технологічного процесу. Проте, аналіз літературних джерел (наприклад, [1÷6 та ін.]) вказує на недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку використання формальних критеріїв вибору ефективних керувальних дій для оптимізації процесу відпрацювання бурових доліт нового покоління: осьової сили на долото і швидкості його обертання за умови, що витрата бурового розчину є оптимальною.

Слід зауважити, що основним фактором ефективного руйнування гірських порід у процесі буріння глибоких свердловин є підведення і підтримання стабільної осьової сили на долото, особливо під час буріння роторним способом внаслідок складної динаміки роботи колоди бурильних труб.

Визначення ефективних керувальних дій для процесу буріння залежить від характеристики привода долота, яке, як правило, обумовлює певні обмеження [7, 8]. Якщо при турбінному бурінні неможливо змінювати швидкість обертання долота незалежно від осьової сили, оскільки ці параметри залежать від характеристики турбобура, то швидкість обертання привода ротора, в принципі, може бути змінена незалежно від осьової сили на долото, зокрема, шляхом зміни частоти струму живлення відповідних асинхронних двигунів або застосуванням двигунів постійного струму із регульованим збудженням [7, 8]. Відзначимо, що вибір ефективних керувальних дій замість умов регулювання швидкості обертання долота викликає великий практичний інтерес.

Постановка завдання. Метою даної роботи є огляд і аналіз методів визначення ефективних керувальних дій за спрощеними критеріями оптимізації процесу буріння нафтових і газових свердловин роторним способом. Об'єктом дослідження є технологічний процес буріння нафтових

і газових свердловин долотами нового покоління. Об'єктом дослідження є теоретичні і прикладні проблеми оперативного оптимального керування відпрацюванням доліт за спрощеними критеріями оптимізації.

Методологічну основу досліджень становили фундаментальні положення сучасної теорії адаптивного і робастного керування. Для вирішення поставлених завдань використовувались методи системного аналізу та системного підходу, систематизації та узагальнення, порівняльного і структурного аналізу.

Результати. Виходитимемо з того, що крім типу долота процес руйнування породи характеризують і визначають такі параметри: V_m – механічна швидкість буріння, n – швидкість обертання долота, D – діаметр долота, F – осьова сила на долото, k_f – міцність породи. На базі методів теорії розмірностей і \bar{n} -теорема Букінгема М.Г.Бінгем (фірма «Shell development») [10] визначив два безрозмірних критерії, які містять перелічені параметри:

$$\frac{V_m}{n D} \text{ і } \frac{F}{D^2 k_f} . \quad (1)$$

Проте, перший критерій не дає уявлення про фізичний сенс, а другий – неможливо використати у зв'язку з тим, що фактичну міцність породи k_f під час буріння неможливо встановити існуючими методами контролю.

Щоб уникнути цих проблем, параметри, які характеризують процес буріння, було запропоновано обмежити такими величинами: v_m , n , D , F . Два параметри – осьова сила F і діаметр

долота D – можуть бути об'єднані в один $\frac{F}{D}$.

Це – питома осьова сила на 1 см діаметру долота. У такому випадку параметр $\frac{F}{D}$ зв'язаний з

потрібною витратою енергії і може бути використаний як одна з координат графіка. Друга координата повинна містити механічну швидкість буріння v_m , оскільки саме вона є безпосереднім результатом буріння.

Розглянемо, як можна використати швидкість обертання долота n , що залишилася невикористаною. Для цього узагальнимо результати експерименту, проведеного фірмою «Shell development» на блоку породи пісковика, який був розбурений при атмосферному тиску стандартним долотом типу OSC діаметром $4\frac{3}{4}$ " з незадуленими робочими елементами озброєння з промиванням водою при витраті 6,55-6,8 л/с. Під час експерименту змінювали швидкість обертання

ня n . За результатами експериментів побудували графіки залежності механічної швидкості буріння v_m від питомої осьової сили на долото $\frac{F}{D}$ за різних швидкостей обертання n ротора: $\bullet n = 20$ об/хв; $\times n = 50$ об/хв; $\circ n = 100$ об/хв. (рис.1). Бачимо, що при зміні осьової сили F на долото механічна швидкість буріння v_m різна за різних швидкостей обертання ротора n .

Якщо тепер побудувати графіки залежності проходки за один оберт долота v_m/n від питомої осьової сили на долото $\frac{F}{D}$, то ділянки ОА, ОВ, ОС, які відносяться до різних кривих на рис. 1, ляжуть на одну спільну лінію ОС (рис.2). Ця крива $\frac{v_i}{n} = f\left(\frac{F}{A}\right)$ характеризує мінімальні витрати енергії на одиницю об'єму вибуреної породи і дає основу для визначення параметра, який характеризує буримість породи [10]. Крім того, залежність $\frac{v_i}{n} = f\left(\frac{F}{A}\right)$ дозволяє отримати рівняння, які описують процес буріння.

Рівняння буріння для інтервалів порід з однаковою буримістю породи ($k_f \cdot 10^{-5}$) фірма США «Factormatic drilling systems» [12] використовує у такому вигляді:

$$k_f \cdot 10^{-5} = \frac{h(t_a)}{t_a \cdot F \cdot n} = \frac{(v_i)_{\text{під.}}}{Fn}, \quad (2)$$

де $(v_i)_{\text{під.}} = \frac{h(t_a)}{t_a}$ – середня механічна швидкість буріння.

Добуток $F \cdot n$ для нормальних робочих режимів вважають постійною величиною. Тоді залежності між швидкістю обертання долота n і осьовою силою F на долото при різних значеннях $Fn = \text{const}$ можна проілюструвати графіками, наведеними на рис. 3. На графіках можна визначити граничні значення сполучень керувальних дій (осьової сили на долото F і швидкості його обертання n), а також обмеження за глибиною, розташуванням свердловини або розміром і типом долота. При цьому слід врахувати характер зміни осьової сили на долото в часі (рис. 4).

Розглянемо вибір керувальних дій для бурових установок з регульованою швидкістю обертання долота ($n = \text{var}$) і з нерегульованою ($n = \text{const}$).

Перший варіант: $n = \text{var}$.

Незалежно від принципу регулювання керувальних дій в конкретних умовах буріння для традиційних шарошкових доліт існує певний час роботи долота, який відповідає максимуму рейсової швидкості $V_p \rightarrow \text{max}$, або економічної швидкості $V_e \rightarrow \text{max}$. Цей час визначають [4] для різних інтервалів, які відрізняються за глибиною і властивостями гірських порід, на основі даних за раніше пробуреними в таких самих умовах свердловинами. Для розрахунків V_p і V_e використовують такі формули:

$$V_p = \frac{h(t_a)}{t_a + t_{\text{нр}}}, \quad (3)$$

$$V_e = \frac{h(t_a)}{t_a + t_{\text{нр}} + \frac{C}{B_a}}, \quad (4)$$

де: $h(t_0)$ – проходка на долото;
 t_0 – час буріння;
 $t_{\text{нр}}$ – витрати часу на роботи, пов'язані із заміною долота, нарощуванням колони бурильних труб і спуско-підіймальними операціями;
 C – собівартість метра проходки свердловини, яка дорівнює

$$\tilde{N} = \frac{B_a(t_a + t_{\text{нр}}) + B_{\text{д}}}{h(t_a)}, \quad (5)$$

B_r – вартість 1 години роботи бурової установки;

$B_{\text{д}}$ – вартість долота.

Формули (3) і (4) для розрахунків V_p і V_e не містять керувальних дій – осьової сили на долото F і швидкості його обертання n . Проте, для оперативного оптимального керування процесом буріння за допомогою комп'ютерно-інтегрованих технологій необхідно умови його оптимізації виразити формулами, які б містили керувальні дії, тобто отримати функції мети.

Слід відзначити, що досягнення максимальних значень показників V_p і V_e протягом рейсу долота у деяких випадках може і не призвести до максимально високих показників по свердловині загалом [2]. Тому ефективність кожного рейсу долота треба оцінювати не ізольовано, а з урахуванням впливу показників цього рейсу долота на рейсову і економічну швидкості буріння по свердловині загалом. Це ускладнює проблему оптимізації процесу буріння, вимагає координації роботи усіх підсистем. Тому на даному етапі буріння нафтових і газових свердловин традиційними шарошковими долотами таку спрощену оцінку ефективності роботи долота на базі формул (3) і (4) можна вважати виправданою.

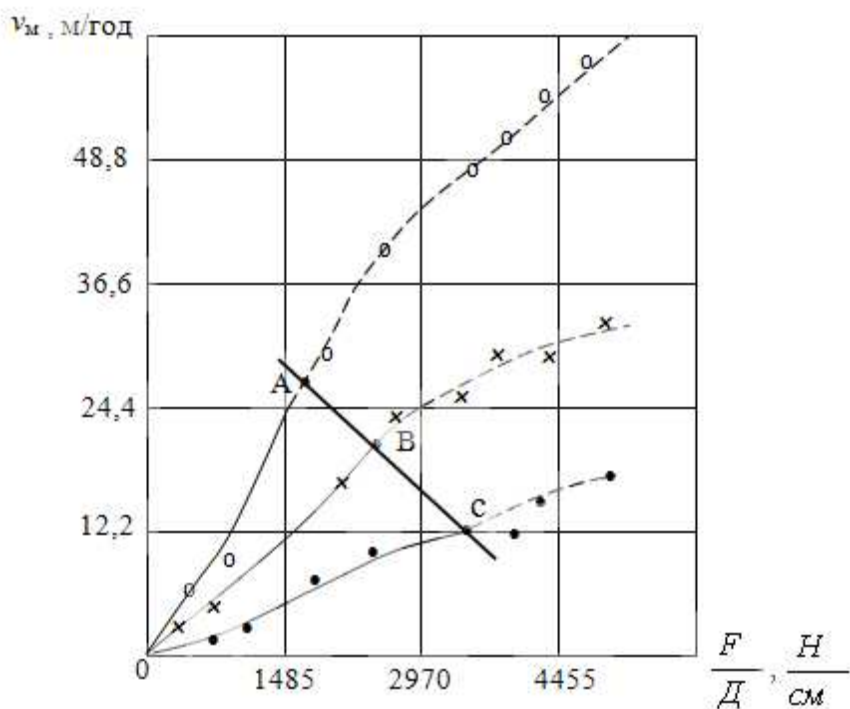
Визначені експериментальним шляхом час роботи долота, при якому досягається максимум рейсової швидкості V_p , позначимо через t_{V_p} , а час, при якому досягається максимум економічної швидкості, через t_{V_e} .

При побудові критерію керування врахуємо, що час роботи шарошкового долота на вибої свердловини обмежений стійкістю його опор. Тоді залежність часу роботи долота від параметрів режиму буріння можна подати у такому вигляді [4]:

$$t = \frac{a}{n \cdot F^\gamma}, \quad (6)$$

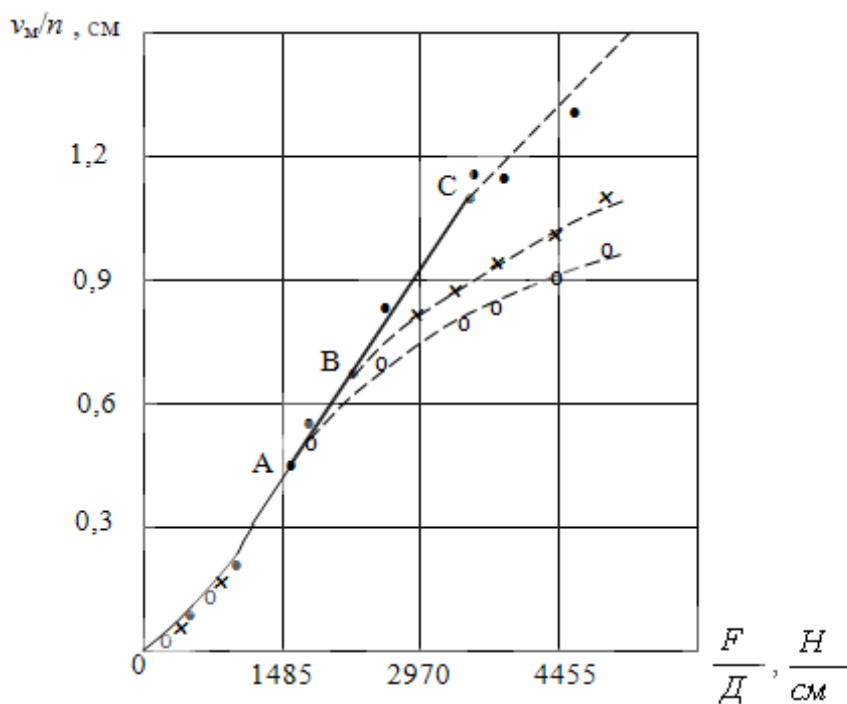
де $a = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$ – постійні коефіцієнти для кожного конкретного сполучення «долото–порода», методика ідентифікації яких загальновідома.

Після підстановки у формулу (6) значень t_{V_p} і t_{V_e} замість t отримаємо



• $n = 20$ об/хв; × $n = 50$ об/хв; ° $n = 100$ об/хв

Рисунок 1 – Графіки залежностей механічної швидкості буріння v_m від питомої осьової сили на долото $\frac{F}{D}$ типу OSC діаметром 4 $\frac{3}{4}$ " за різних швидкостей обертання n ротора



• $n = 20$ об/хв; × $n = 50$ об/хв; ° $n = 100$ об/хв

Рисунок 2 – Графіки залежностей проходки за один оберт долота v_m/n від питомої осьової сили на долото $\frac{F}{D}$ типу OSC діаметром 4 $\frac{3}{4}$ " за різних швидкостей обертання n ротора:

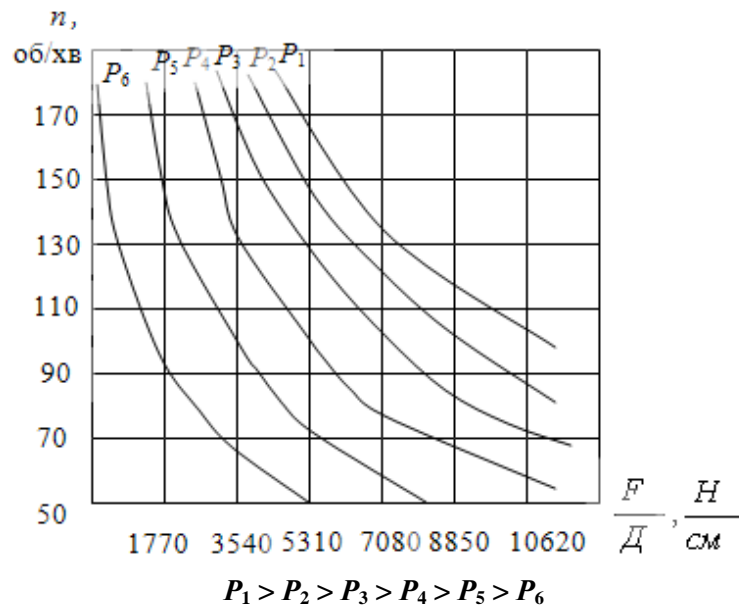


Рисунок 3 – Графіки залежностей швидкості обертання долота n від питомої осьової сили на долото $\frac{F}{D}$ для різних постійних значень потужності $P = \frac{F}{A} n = \text{const}$

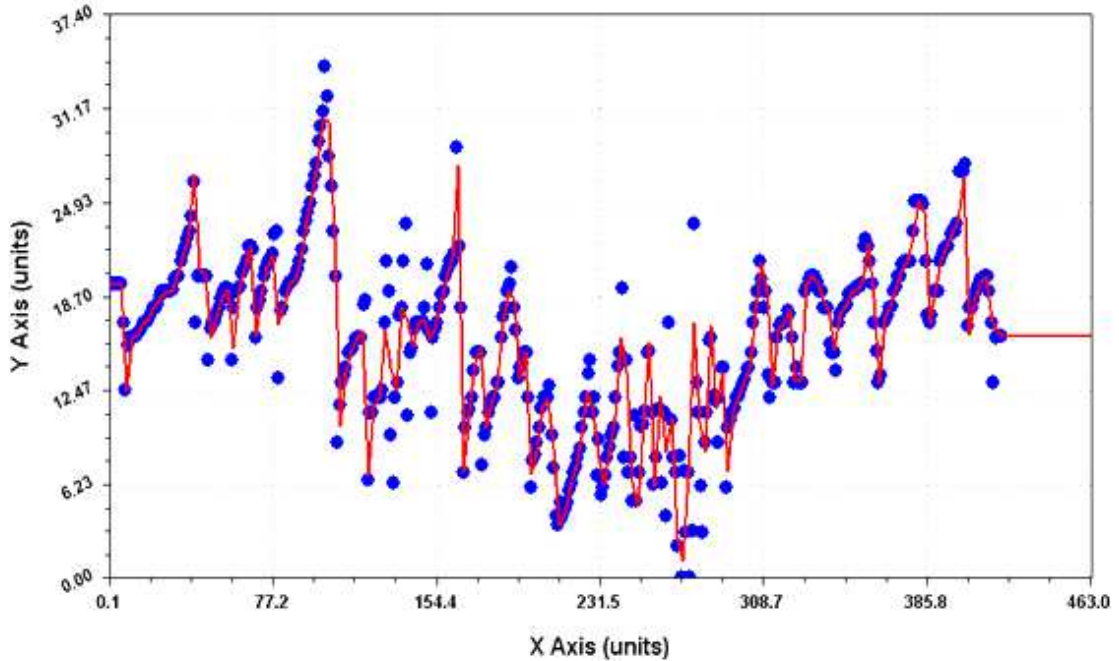


Рисунок 4 – Графік зміни осьової сили на долото в часі, отриманий в результаті обробки експериментальних даних

$$t_{V_p} = \frac{a}{n \cdot F^\gamma}, \quad (7)$$

$$t_{V_e} = \frac{a}{n \cdot F^\gamma}. \quad (8)$$

Із формули (7) можна визначити швидкість обертання долота, ефективну для забезпечення максимуму рейсової швидкості

$$n_{V_p} = \frac{a}{t_{V_p} \cdot F^\gamma}. \quad (9)$$

Відповідно швидкість обертання долота, що є ефективною для забезпечення максимуму економічної швидкості, дорівнює

$$n_{V_{\dot{a}}} = \frac{a}{t_{V_{\dot{a}}} \cdot F^\gamma}. \quad (10)$$

Співвідношення (9) і (10) є робочими характеристиками долота, які визначають ефективний вектор керувальних дій [5] $\vec{u}^T = (n, F)$ при бурінні традиційними шарошковими долотами для критеріїв $V_p \rightarrow \text{max}$ і $V_e \rightarrow \text{max}$. Недоліком є те, що параметри моделей (9) і (10) $a, \gamma, t_{V_p}, t_{V_{\dot{a}}}$ визна-

чаються апіорі за результатами раніше пробурених свердловин, що вносять певну нечіткість і невизначеність в одержані результати.

Для досягнення прийнятної ступеня стабільності і відтворюваності результатів експериментів дослідники США, ґрунтуючись на даних промислових досліджень, дають різні значення показника α із множини {1; 1,1; 1,25; 2,4} [2,6]. Такі різні значення коефіцієнта α свідчать про те, що технологічні моделі (9) і (10) відображають процес буріння лише в умовах експерименту і непридатні для застосування в інших умовах. Це пояснюється не тільки геолого-технічними умовами буріння, але й застосуванням різних типорозмірів доліт на неоднакових глибинах. Проте, навіть у випадку буріння на одній і тій ж глибині долотами одного типорозміру механічні характеристики привода долота відрізняються між собою внаслідок неточностей, допущених при виготовленні, а це призводить до того, що коефіцієнти залежностей (9) і (10) не можна вважати постійними навіть для схожих умов буріння.

Слід зазначити, дослідники фірми «Factormatic» (США) встановили, що в межах звичайної практики буріння показник ступеня 1 цілком підходить як для осьової сили на долото, так і для швидкості його обертання [12]. Таке ж значення цього показника прийняте і в математичній моделі Галле-Вудса, про що як на недолік вказано у роботі [6].

Другий варіант: $n = \text{const}$.

Під час буріння з постійною швидкістю обертання долота $n = \text{const}$ осьову силу на долото вибирають [4] за максимумом проходки h_A на одиницю роботи долота, за максимумом проходки h_3 на одиницю зносу долота, за максимумом механічної швидкості буріння на одиницю осьової сили, прикладеної до долота, за максимумом проходки на один оберт, за мінімумом питомих витрат енергії та ін.

Розглянемо кожен із цих критеріїв окремо.

• Роботу A бурового долота за певний проміжок часу Δt з постійним значенням потужності P , яка підведена до долота протягом часу Δt , можна подати у вигляді добутку

$$\Delta A = P \cdot \Delta t \quad (11)$$

Тоді проходку на одиницю роботи долота можна визначити так

$$h_A = \frac{\Delta h}{\Delta A} = \frac{\Delta h}{P \cdot \Delta t} \quad \text{або} \quad h_A = \frac{V_i}{D} \quad (12)$$

де $V_i = \frac{\Delta h}{\Delta t}$ – середнє значення механічної швидкості буріння на інтервалі проходки Δh протягом часу Δt .

Оскільки багато дослідників [2, 4, 5, 6, 7, 8 та ін.] вказують на щільну кореляцію потужності P на долоті з осьовою силою на долото F , при $n = \text{const}$, тобто $P = k_1 F$, то значення проходки долота h_A можна подати так

$$h_A = \frac{V_i}{k_1 F} \quad (13)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності між потужністю і осьовою силою на долото.

Отже, перший критерій можна записати у такому вигляді

$$h_A(x) = \frac{V_i}{P} \xrightarrow{x \in S} \max \quad (14)$$

або

$$h_A(x) = \frac{V_i}{k_1 F} \xrightarrow{x \in S} \max \quad (15)$$

де

$$S = \{(F_i, n_i)_{i=N}; F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}; n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}; h_i > 0\}.$$

Слід зазначити, що складові цих критеріїв піддаються неперервному контролю в реальному часі. Якщо врахувати, що критерій (12) має розмірність [м/(кВт·год)], то зрозуміло, що критерій мінімуму питомих витрат енергії є обмеженим відносно критерію максимуму проходки на одиницю роботи долота.

• Другий критерій – максимум проходки долота h_3 на одиницю зносу долота – формується як відношення приросту проходки Δh за деякий час буріння Δt до зносу опору долота $\Delta \mu$ протягом часу буріння інтервалу Δh , тобто

$$h_3 = \frac{\Delta h}{\Delta \mu} \quad (16)$$

Враховуючи, що $\Delta h = V_m \cdot \Delta t$ і $\Delta \mu = V_3 \cdot \Delta t$, де V_3 – швидкість зносу опору долота, отримаємо вираз для проходки, яка припадає на одиницю зносу опору долота (питомої проходки):

$$h_3 = \frac{V_i}{V_3} \quad (17)$$

Оскільки найбільш розповсюдженою формою зносу опору шарошкових доліт є зростання радіального люфта підшипників, які створюють опору, то під швидкістю зносу опору можна розуміти швидкість зростання радіального люфта підшипників. Проте, цей параметр не піддається контролю в реальному часі. Тому його визначають [4], користуючись результатами досліджень ряду зарубіжних і вітчизняних вчених, які встановили такий наближений зв'язок швидкості зношення опору долота V_3 з осьовою силою на долото F при $n = \text{const}$

$$V_3 = b F^\alpha \quad (18)$$

де b – коефіцієнт пропорційності.

Тоді у відповідності з (17) і (18) відносне значення питомої проходки матиме такий вигляд

$$h_3 = \frac{V_i}{b F^\alpha} \quad (19)$$

Отже, другий критерій можна записати у такому вигляді

$$h_3(x) = \frac{V_i}{b F^\alpha} \xrightarrow{x \in S} \max \quad (20)$$

Якщо у формулі (20) $\alpha=1$, тоді критерій (20) співпадає з критерієм (15).

Бачимо, що для реалізації описаних принципів вибору осьової сили на долото за критеріями (14), (15), (20) потрібна інформація про залежність механічної швидкості буріння V_m від осьової сили на долото F у різні періоди роботи буро-

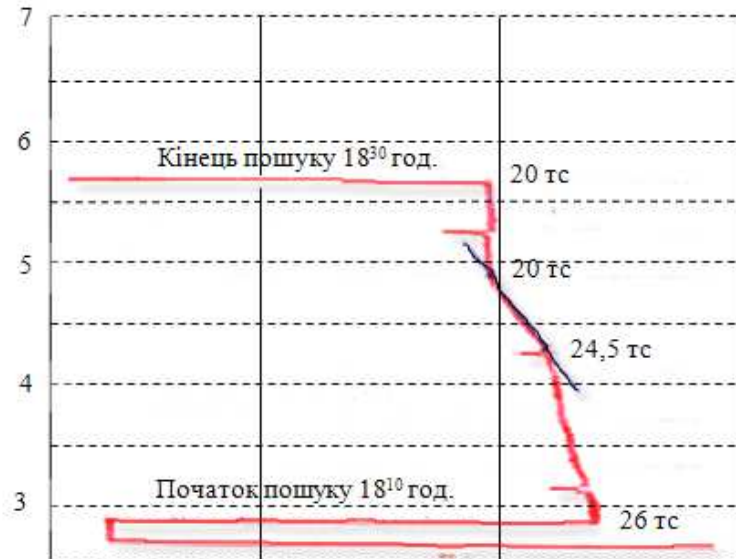


Рисунок 5 – Взірець графіку зміни осьової сили на долото у ході проведення експерименту за вибором діапазону сили, яка рекомендується: долото Ш 295,3 СЗГВ, частота обертання ротора -70 хв^{-1} , рекомендується бурити з силою 20-24,5 тс, загальний час пошуку - 20 хв

вого долота. Ця залежність потрібна і для реалізації третього критерію $\frac{V_i}{F}(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max$.

• Методи отримання інформації про залежність $V_m = f(F)$ визначимо із рівняння, запропонованого Бордачевським В.Т., яке описує перехідний процес в системі подачі бурильного інструменту [4]:

$$V_i = V_{\hat{e}} \pm \frac{L}{ES} \frac{dF}{dt}, \quad (21)$$

де: V_m – миттєва механічна швидкість поглиблення долота, $V_m = \frac{dF}{dt}$;

V_k – швидкість переміщення верхнього кінця колони бурильних труб;

L – глибина буріння;

E – модуль потужності матеріалу бурильних труб;

S – площа поперечного перерізу стінки бурильних труб.

Якщо позначити

$$\frac{L}{ES} = \tilde{N}_0,$$

то формулу (21) можна переписати у такому вигляді

$$V_i = V_{\hat{e}} \pm \tilde{N}_0 \frac{dF}{dt}. \quad (22)$$

Вона дає змогу виявити декілька способів визначення залежності $V_m = f(F)$. Найбільш простими із них є спосіб постійної осьової сили на долото (тобто $F = \text{const}$) і спосіб відсутності подачі бурильного інструменту, коли $V_k=0$. Розглянемо кожний із них.

Згідно зі способом, який базується на підтриманні постійної осьової сили на долото, осьова сила на бурове долото на деякому інтервалі

буріння підтримується постійною. Отже похідна $\frac{dF}{dt} = 0$, тож із формули (22) маємо

$$V_m = V_k. \quad (23)$$

Це дає змогу визначити механічну швидкість буріння V_m за швидкістю переміщення верхнього кінця колони бурильних труб V_k . Оскільки для визначення залежності $V_m = f(F)$ необхідно визначити декілька точок при різних значеннях осьової сили F , то умовою проведення такого експерименту є відсутність суттєвого зносу озброєння долота і змін властивостей гірських порід.

Проте відомо [2], що процес вимірювання механічної швидкості буріння супроводжується значними похибками, що вимагає усереднення значень V_m , а це неминуче зменшує швидкодію системи керування.

Згідно зі способом, який базується на припиненні подачі бурильного інструменту, осьова сила на долото збільшується до певного значення, після чого подача інструменту припиняється, тобто швидкість переміщення верхнього кінця колони бурильних труб $V_k = 0$. Тоді у відповідності з формулою (20)

$$V_i = -\tilde{N}_0 \frac{dF}{dt}, \quad (24)$$

тобто швидкість переміщення нижнього кінця колони бурильних труб спадає.

Отже, інформацію про механічну швидкість буріння можна оцінити, вимірюючи осьову силу на долото. При максимальному значенні $\frac{dF}{dt}$ швидкість проходки V_m також буде максимальною [13]. Значення осьової сили F зазвичай контролюється за допомогою давача ваги колони бурильних труб (КБТ):

$$F = W_0 - W - W_p \pm W_T, \quad (25)$$

де: W_0 – повна вага КБТ, яка висить на гаку;
 W – вага КБТ на гаку під час буріння;

W_ρ – втрата ваги від зміни густини промивальної рідини;

W_T – сила тертя бурильних труб до стінки свердловини.

Оскільки в процесі роботи долота повна вага W_0 КБТ, а також W_ρ і W_T змінюються несуттєво при $Q_0 = \text{const}$, то, продиференціювавши рівняння (25) за часом, отримаємо

$$\frac{dF_t}{dt} = - \frac{dW_t}{dt} . \quad (26)$$

Знак мінус перед W_t означає, що при зміні осьової сили на долото у бік збільшення вага на гаку змінюється у бік зменшення. Отже, під час визначення режиму, який забезпечує максимум механічної швидкості буріння

$V_i(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max$, можна скористатися величиною $\frac{dW_t}{dt}$ замість $\frac{dF_t}{dt}$.

Цей спосіб оперативного визначення механічної швидкості буріння на враховує інерційності КБТ. При цьому вважається, що сили тертя і адгезії під час перехідних процесів залишаються незмінними. Крім того, досягнення максимального падіння механічної швидкості буріння V_m при

максимальному значенні $\left| \frac{dF}{dt} \right|$ зовсім не означає,

що при відповідному збільшенні осьової сили на долото відбудеться така ж зміна механічної швидкості буріння, як і при зменшенні, оскільки, це мало б місце лише при лінійній залежності $V_m = f(F)$.

Результати досліджень цього методу, які були проведені при обертанні КБТ зі швидкістю 4-8 об/хв при бурінні вертикальних свердловин глибиною 3000 м з промиванням глинистим розчином, підтвердили можливість використання цього способу визначення V_m . Коефіцієнт кореляції значень механічної швидкості буріння із значеннями V_m , отриманими першим способом, дорівнює 0,74 [4].

Отже, критерії вибору ефективної осьової сили на долото з урахуванням інформації про залежність $V_m = f(F)$ протягом перехідного процесу автори роботи [4] запропонували подати у вигляді:

$$F_{\text{эф}} = F(t) \Big|_t , \quad (27)$$

де: $F(t)$ – значення осьової сили на долото в різні моменти часу перехідного процесу в режимі $V_m=0$;

$F_{\text{эф}}$ – ефективне значення осьової сили на долото, при якому задовольняється деяка умова I .

Такими умовами можуть бути

$$V_i(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max ,$$

$$h_p(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max , \quad (28)$$

$$h_\zeta(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max \text{ та ін.}$$

Умови (28) спрощуються, якщо врахувати формулу (24), умову $n = \text{const}$ і те, що потужність P_t , яка реалізується долотом на вибої свердловини, пропорційна осьовій силі на долото F . Тоді

$$V_i = k \frac{dP_t}{dt} , \quad (29)$$

де k – коефіцієнт пропорційності між осьовою силою на долото і потужністю на долоті.

Зважаючи на це, отримаємо наступні значення умов I :

$$I_1 = V_i(x) = -\tilde{N}_0 \frac{dF}{dt} \xrightarrow{x \in S} \max , \quad (30)$$

$$I_2 = h_p(\delta) = \left(\frac{dF_t}{F} \right) \xrightarrow{x \in S} \max , \quad (31)$$

$$I_3 = h_p(\delta) = \left(\frac{dP_t}{P} \right) \xrightarrow{x \in S} \max , \quad (32)$$

$$I_4 = h_\zeta(\delta) = \left(\frac{dF_t}{F^\alpha} \right) \xrightarrow{x \in S} \max . \quad (33)$$

Критерії (30), (31), (32), (33) є спрощеними статичними регулярними критеріями ефективності процесу буріння.

Слід зауважити, що досі не існує єдиної думки науковців щодо попередньої оцінки ефективності таких критеріїв. Дійсно, на перший погляд, відомості про відносну ефективність, що розглядаються, можна отримати, порівнявши значення рейсової V_p або економічної V_e швидкостей буріння у разі застосування цих критеріїв в аналогічних геолого-технічних умовах. Проте, послідовне порівняння різних критеріїв неможливе на практиці, оскільки процес буріння є не відтворюваним, а різноманітність умов буріння, вплив багатьох випадкових факторів на показники роботи долота вимагають пошуків інших методів для попередньої оцінки ефективності критеріїв.

Для подолання вказаної проблеми можна застосувати метод, який передбачає два етапи. На першому етапі накопичується інформація про зміну буріння, а на другому – ця інформація обробляється на ЕОМ для оцінки ефективності досліджуваних критеріїв і моделювання процесу керування бурінням у відповідності з критеріями, що досліджуються.

В результаті таких досліджень [4,16] було встановлено, що критерій

$$V_i(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max \quad (34)$$

є досить ефективним для буріння турбобурами свердловин глибиною до 3000 м. Проте, його доцільно застосовувати на невеликих глибинах [16], де втрачає час на спуско-підймальні операції незначні.

Для буріння свердловин з фіксованою швидкістю обертання долота $n = \text{const}$ на великих глибинах ефективними є критерії

$$h_p(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max \quad (35)$$

та

Таблиця 1 – Критерії вибору ефективних керувальних дій для процесу буріння

№	Назва критерію	Критерій	Аналітичний вираз	Область застосування
1	А	$V_i(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max$ $S = \{(F_i, n_i)_{i=1-N};$ $F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max};$ $n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}; h_i > 0\}.$ Вибір осьової сили за максимумом механічної швидкості буріння	$F_{\hat{\delta}} = F(t) \left \frac{dF_t}{dt} \xrightarrow{x \in S} \max \right.$	Буріння свердловин роторним способом з $n = \text{const}$, а також турбобуром і електробуром
2	В	$h_p(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max$ Вибір осьової сили за максимумом проходки на одиницю роботи, що виконується долотом	$F_{\hat{\delta}} = F(t) \left \frac{dP_t}{P} \xrightarrow{x \in S} \max \right.$ $F_{\hat{\delta}} = F(t) \left \frac{dF_t}{F} \xrightarrow{x \in S} \max \right.$	
3	С	$h_\zeta(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max$ Вибір осьової сили за максимумом питомої проходки	$F_{\hat{\delta}} = F(t) \left \frac{dF_t}{F^\alpha} \xrightarrow{x \in S} \max \right.$	
4	Д	Вибір параметрів режиму буріння за робочими характеристиками долота	$F_{\hat{\delta}} = F(t) \left \frac{dF_t}{dt} \xrightarrow{x \in S} \max \right.$ $n = \frac{C_{V_p}}{F^\alpha} \text{ (для режиму } V_\delta(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max \text{),}$ $n = \frac{C_{V_{\hat{\delta}}}}{F^\alpha} \text{ (для режиму } V_{\hat{\delta}}(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max \text{)}$	Буріння свердловин роторним способом з регульованою швидкістю обертання і електробуром ($n = \text{var}$)

$$h_\zeta(\delta) \xrightarrow{x \in S} \max, \quad (36)$$

які дозволяють досягти високих значень рейсової V_p та економічної V_e швидкостей буріння (табл.1).

Проте у міру її поглиблення вибрані ефективні параметри режиму буріння можуть стати не ефективними у зв'язку зі змінами умов на вибої свердловини. Тому виникає необхідність визначити, коли доцільно повторити пошук ефективних параметрів режиму для нових умов буріння. При цьому слід враховувати, що умови на вибої свердловини змінюються неперервно, але неперервно визначити ефективні параметри режиму недоцільно, оскільки за короткий проміжок часу ці зміни не є суттєвими. Тому вибирають нові значення параметрів режиму буріння лише тоді, коли умови на вибої змінюються досить суттєво, тобто коли долото перейде в гірські породи іншої буримості. Інформативним параметром, який може бути використаний для оцінювання буримості гірських порід, є значення середньої механічної швидкості буріння за даний проміжок часу. Проте, під час буріння з постійними параметрами режиму величина механічної швидкості може суттєво змінитися не тільки у зв'язку із змі-

нами фізико-механічних і абразивних властивостей гірських порід, але й зі збільшенням ступеня зносу озброєння долота. В обох випадках доцільно повторити пошук ефективних параметрів режиму буріння.

Описані критерії вибору ефективних керувальних дій, на наш погляд, мають ще один недолік, оскільки базуються на гіпотезі, що швидкість обертання долота $n = \text{const}$. Теоретично і експериментально доведено [6, 9], що зміна осьової сили на долото F веде до зміни швидкості його обертання внаслідок властивостей механічних характеристик самого долота, колони бурильних труб і приводного двигуна. Дослідження [9] характеру залежності $n = f(F)$, проведені на базі промислових даних за допомогою програми Curve Expert, довели, що оптимальними моделями $n = f(F)$ є нелінійні моделі Hoerl Model, Weibull Model, Rational Function, MMMF Model та ін., які адекватно (абсолютна середньоквадратична похибка $\leq 0,0025$, відносна похибка $\leq 0,006\%$) відображають результати експериментів. Вони є придатними для різних умов буріння, різних високопродуктивних шарошкових доліт та безопорних доліт типу PDC, що дає змогу ефек-

тивно розв'язувати задачі ідентифікації параметрів моделі та оптимального керування за єдиним алгоритмом. Наприклад, найбільш проста і точна Hoerl Model має такий вигляд

$$n^* = ab^{F^*} F^c, \quad (37)$$

де: $a=1,27$, $b=0,66$, $c=0,32$ – параметри моделі для умов експерименту;

F^* , n^* – відносні значення осьової сили і швидкості обертання долота.

Проте, конкретні значення ефективних керувальних дій можуть бути визначені в процесі буріння за допомогою інтелектуальних технологій керування.

Дійсно, для визначення оптимальної сили на долото може бути використаний принцип максимуму Понтрягіна [2] метод бар'єрних функцій [11], метод генетичних алгоритмів тощо. Швидкість обертання долота відповідає його робочим характеристикам, може бути визначена автоматично згідно рівняння моделі (37) і задана автоматично за допомогою критерію для керування швидкістю обертання привода ротора.

Висновок. Проаналізовано методи визначення ефективних керувальних дій за спрощеними статичними регулярними критеріями оптимізації процесу буріння, як складного об'єкта, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом завад. Оцінено ефективність розглянутих критеріїв, їх недоліки і запропоновано використовувати для визначення оптимальних керувальних дій математичну модель взаємозв'язку швидкості обертання долота з осьовою силою на долото.

Література

1 Драганчук О.Т. Аналіз відпрацювання доліт РДС на родовищах України і світу / О.Т.Драганчук, Т.О.Пригородська // Нафтогазова енергетика. – 2008. – №4. – С.11-15.

2 Семенцов Г.Н. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості / Г.Н.Семенцов [та ін.] // Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 300 с.

3 Луценко И.А. Эффективность как единый критерий управления технологическими процессами / И.А.Луценко // Вісник Криворізького техніч. ун-ту. – 2006. – Вип.11. – С.133-137.

4 Куликовский Л.Ф. Информационно-измерительная техника для управления процессом бурения / Л.Ф.Куликовский, В.М.Белоусов, Ю.В.Грачев, А.А.Степанян, М.А.Фингернт. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1969. – 128 с.

5 Фингернт М.А. Рациональная эксплуатация шарошечных долот / М.А.Фингернт. – М.: Недра, 1965. –104 с.

6 Пат.2174596 Российская федерация МПК С2. Способ регулирования условий бурения, влияющих на режим эксплуатации бура / Смитт Ли Морган (US), Голдман Виллям Э. (US), заявитель и патентообладатель Дрессер Индаст-

риз, ИНК. (US). – 28119444/03; заявл. 21.03.1997, опубл. 10.102001.

7 Семенцова А.А. Устройство для измерения крутящего момента ротора бурового механизма / А.А.Семенцова, Т.А.Ильк, И.Г.Сенечко // Химическое машиностроение. –1981. – №3. – С.34-35.

8 Семенцова А.А. Средства контроля момента на долоте, осевой нагрузки и частоты вращения долота при бурении наклонно направленных скважин электробурами / А.А.Семенцова // РНТС Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – 1982. – №3. – С.6-7.

9 Гутак О.В. Аналіз і удосконалення математичної моделі Галлі-Вудса / О.В.Гутак // Вісник Хмельницького нац. ун-ту. Технічні науки. – 2009. – №3. – С.198-208.

10 Бингхем М.Г. Проблемы буримости горных пород / М.Г.Бингхем; [перевод]. – М.: ВНИИОЭНГ, 1966. –120 с.

11 Мислюк М.А. Моделирование явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі: [навчальний підручник] / М.А.Мислюк, Ю.О.Зарубін. – Івано-Франківськ: Екор, 1999. – 496 с.

12 Леонов А.И. Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации процессов бурения / А.И.Леонов, К.А.Парфенов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1976. – 53 с.

13 Бражников В.А. Система экстремального управления турбинным бурением / В.А.Бражников // Сборник научных трудов Куйбышевского политехн. ин-та: Автоматическое управление технологическими процессами и промышленными установками. – Куйбышев: КуАИ, 1984. – С.48-53.

14 Цыганков В.А. Адаптивная система управления процессом бурения с комбинированным управлением / В.А.Цыганков. – Известия вузов: Приборостроение. – 1974. – С.5-11.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
12.03.12*

*Рекомендована до друку професором
Г. Н. Семенцовим*