

# Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 681.513.6:622.243

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ КООРДИНАТНИХ ЗБУРЕНЬ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОГЛИБЛЕННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

*М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов, Н.В. Сабат*

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

*На основі математичного опису фізичних процесів відпрацювання шарошкових доліт розроблено теоретичні засади оперативного контролю буримості гірських порід, які включають узагальнену математичну модель буримості в просторі станів, динамічну інформаційну модель, метод визначення базових значень показників буримості. Пропонується використання безконтактного автоматизованого контролю буримості, що дає змогу врахувати збурення в системі оптимального керування процесом буріння, збільшити ресурс доліт, скоротити кількість аварій і ускладнень в процесі буріння. Запропоновано метод визначення базових значень механічної швидкості буріння, який полягає у тому, що для автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід обирається та механічна швидкість, яка визначається на початку буріння алмазним або незатупленим шарошковим долотом при бурінні з оптимальними параметрами режиму. Це дає змогу визначати взаємозв'язки між показниками буримості з глибиною свердловини, які є базою для поточної оптимізації та вибору оптимальних режимів буріння інших свердловин, що перебувають в аналогічних умовах.*

Ключові слова: автоматизований контроль, математичне моделювання, ідентифікація, координатне збурення, буримість, буріння.

*По математическому описанию физических процессов обработки шарошковых долот разработаны теоретические основы оперативного контроля буримости горных пород, включающие обобщенную математическую модель буримости в пространстве состояний, динамическую информационную модель, метод определения базовых значений показателей буримости. Предлагается использовать безконтактный автоматизированный контроль буримости, что позволяет учесть возмущения в системе оптимального управления процессом бурения, увеличить ресурс долот, уменьшить количество аварий и осложнений. Предложен метод определения базовых значений механической скорости бурения, который основывается на том, что для автоматизированного безконтактного контроля буримости горных пород выбирается механическая скорость, зависящая от параметров режима. Это позволяет определить взаимосвязь между показателями буримости и глубиной скважин, что является базой для текущей оптимизации и выбора оптимальных режимов бурения скважин, находящихся в аналогичных условиях.*

Ключевые слова: автоматизированный контроль, математическое моделирование, идентификация, координатное возмущение, буримость, бурение.

*Article is devoted to the development of identification method and automated noncontact control of rocks drillability in the process of deepening oil and gas wells, that allows to control coordinate perturbations (drillability of rock) regardless of dimension-types of drilling instrument and geotechnological terms as well as to amend control action of the drilling process.*

*On the basis distribution analysis of drillability index and control errors, probability of erroneous alarm, probability of indefinite refuse and control authenticity were determined that enabled to ground the determination method of rocks of threshold value of drillability for the automated checking system. As a sign of drillability change a kind of supervision with the level of noise which exceeds set rocks was used. The copulas of systematic and casual control errors with the index of rocks drillability of are set that allow to use it for tasks decision concerning optimization of drilling control process.*

*Structural, algorithmic and programmatic provision of device for the automated noncontact control of rocks drillability is offered that enables to integrate it in existent control system by drilling process of SKUB-M2.*

Keywords: automated control, mathematical design, identification, coordinate perturbation, drillability, drilling.

**I Вступ.** Розвиток нафтової і газової промисловості характеризується зростанням обсягів пошуково-розвідувального буріння свердловин в 6 разів порівняно з 2004 р., як це передбачено «Енергетичною стратегією України до 2030 року та подальшу перспективу». За таких умов протягом 2006-2030 рр. можливий приріст розвіданих запасів нафти до 150 млн.т. При цьому спостерігається тенденція до збільшення глибин свердловин, буріння яких ведеться, здебільшого, роторним способом. Для буріння нафтових і газових свердловин використовується нове покоління тришарошкових доліт, які забезпечують проходку на одне долото до 2000 м, а також алмазні долота з проходкою до 6000 м. В результаті одним долотом розбурюються декілька різномірних шарів порід, буримість яких треба знати, щоб уточнити параметри математичної моделі і визначити оптимальні керувальні дії для наступного інтервалу буріння. Проте аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, показав, що відомі методи контролю буримості порід як координатного збурення не відповідають сучасному рівню автоматизації та інформаційної забезпеченості бурових підприємств нафтогазовидобувної галузі. Вони мають істотні обмеження, серед яких неможливість отримання інформації для автоматичної системи керування про основне координатне збурення в реальному часі.

Це обумовлено тим, що технологічний процес поглиблення свердловини є нелінійним стохастично-хаотичним процесом, який здійснюється за умов апріорної та поточної невизначеності і перебуває під впливом адитивних і мультиплікативних завад різного типу [1,2,3]. Головними збурювальними впливами, що діють на керований об'єкт, є фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід, зокрема такий комплексний чинник, як буримість гірських порід. Контактними методами цей показник визначити неможливо, тому автоматизований контроль буримості гірських порід, який відбувається в умовах неповної інформації, нестаціонарності та невизначеності процесу поглиблення свердловини набуває важливого значення. У зв'язку з цим актуальним є завдання розробки ефективного методу ідентифікації буримості гірських порід в реальному часі і програмно-технічних засобів, здатних функціонувати в складі адаптивної системи керування за умов апріорної та поточної невизначеності відносно структури і параметрів об'єкта керування.

**II Постановка завдання.** Мета роботи полягає в розробленні методу ідентифікації та автоматизованого безконтактного контролю буримості гірських порід в процесі поглиблен-

ня нафтових і газових свердловин. Досягнення вказаної мети забезпечується шляхом розв'язання таких взаємозв'язаних задач: аналізу сучасних методів і систем ідентифікації та контролю буримості гірських порід; проведення досліджень взаємозв'язків основних чинників, що визначають буримість гірської породи, та обґрунтування найбільш інформативного параметру для оцінювання буримості порід в реальному часі; розробка математичної моделі буримості гірських порід, динамічної інформаційної моделі і методу визначення базових значень показника буримості.

Методи дослідження: аналіз зарубіжного та вітчизняного досвіду, систематизація існуючих методів і підходів до питань контролю буримості гірських порід у ході поглиблення нафтових і газових свердловин для обґрунтування актуальності, мети і завдання дослідження; методи ідентифікації, що уможливили удосконалення математичної моделі буримості; теорія планування і оброблення результатів експериментів для визначення взаємозв'язків параметрів і показників процесу буріння з показниками буримості; аналіз, що дозволив виявити властивості аналізованих функцій; математична статистика, що дав змогу дослідити результати експериментів; імітаційне моделювання для підтвердження вірогідності отриманих теоретичних результатів; методи схемо-і системотехнічні для розроблення технічних засобів.

**III Результати.** Аналіз методів оцінювання буримості гірських порід показав, що найбільшого поширення в практиці буріння нафтових і газових свердловин набули лабораторні методи визначення буримості на базі питомої роботи або питомої енергії руйнування за постійних умов руйнування, а також показника, обернено пропорційного твердості порід по штампу; промислові із визначенням буримості на базі енергомісткості долота, відношення коефіцієнта абразивності до початкової миттєвої швидкості буріння, механічної швидкості буріння в оптимальному режимі. Проте, всі ці методи враховують поточної інформації про фізико-механічні властивості гірських порід, які підлягають контролю під час основного періоду роботи долота.

Аналіз існуючих підходів до синтезу технічних засобів контролю буримості гірських порід як координатного збурення, що діє на об'єкт керування дозволив виділити їхні недоліки й переваги. При цьому визначено, що на сьогодні у теорії автоматизації процесів керування в бурінні нафтових і газових свердловин гостро стоїть науково-прикладна проблема створення методу ідентифікації буримості гірських порід, що враховує апріорну і поточну інформацію про властивості процесу поглиб-

лення свердловин та особливості кількісних мір оцінювання буримості гірських порід (початкової механічної швидкості буріння  $v_0$ ; тривалості буріння фіксованого значення проходки  $t_{\phi}$ ; величини проходки за фіксований час  $h_{\phi}$ ; енергоємності буріння одиниці стовбура  $E$ ; питомої енергії руйнування породи  $E_n$ ) і взаємозв'язків її з абразивністю порід.

Раніше було показано [1,2], що лише для доліт, знос оснащення долота яких для певних інтервалів глибин незначний, оцінювати буримість можна за механічною швидкістю буріння

$$v_t = v_0 \varphi(t), \quad (1)$$

де  $\varphi(t)$  – функція зносу долота.

Для опису зміни механічної швидкості буріння використана залежність

$$\frac{dv_t}{dt} = -K_v v_t^m, \quad (2)$$

де:  $K_v$  – коефіцієнт, який характеризує інтенсивність зношення долота і залежить від абразивних властивостей породи;

$m$  – ціле додатне число, яке належить множині  $N$ :  $N = \{0,1,2,3\}$ .

Продиференціювавши рівняння (1) за змінною  $t$  і порівнявши праві частини рівнянь, отримали:

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = -K_v v_0^{m-1} \varphi^m(t). \quad (3)$$

Рівняння (3) дало змогу визначити функцію зносу долота  $\varphi(t)$  за різних значень  $m$  і за початкової умови  $\varphi(0)=1$ . Результати розв'язку рівняння (3) зведені до таблиці 1.

Проведений аналіз показав, що механічна швидкість буріння, навіть за постійних режимних параметрів і в однорідних породах, не залишається незмінною, а зменшує своє значення при підвищенні абразивності гірських порід. Тому оцінкою буримості гірської породи може слугувати початкова швидкість буріння  $v_0$  за умови, що відомі певні базові режимні параметри. Така оцінка не може бути кількісною, а лише якісною.

При бурінні свердловини долотами з високостійким оснащенням, коли  $K_v \rightarrow 0$  і  $\varphi(t) \equiv 1$ , як свідчить аналіз отриманих результатів (табл. 1), єдиним показником оцінки буримості гірських порід може бути початкова швидкість буріння  $v_0$ .

Якщо відбувається зношення долота, то такі показники як  $t_{\phi}$ ,  $h_{\phi}$ ,  $E$  та  $E_n$  за постійних режимних параметрів і при бурінні в однорідних пластах є функціями не тільки  $v_0$ , але й коефіцієнта  $K_v$ , який характеризує абразивні властивості гірської породи.

З метою спрощення процесу математичного моделювання розподілу стратиграфічного розрізу свердловини на ділянки однорідних за буримістю інтервалів порід запропоновано вважати, що свердловина має проектну глибину  $H$ , і на поточній глибині  $h$  буримість породи за розрізом характеризується деяким тезаурусом параметрів  $\langle R \rangle$ , які є функціями глибини свердловини  $r_i = r_i(h)$ ;  $r_i \in R$ ;  $i = 1,2,\dots, N$ , де  $N$  – кількість параметрів.

Запропоновано вважати однорідним за буримістю такий інтервал глибин ( $h^*$ ,  $h^* + \Delta h^*$ ), на якому вектор  $\vec{r}(h)$  не суттєво відхиляється від середнього значення  $\vec{r}$   $|\vec{r} - \vec{r}(h)| \leq \Delta \vec{r}$ , де  $h \in (h^*, h^* + \Delta h^*)$ ;  $r > 0$  – допустима похибка розбиття розрізу свердловини на однорідні за буримістю ділянки. Визначення похибки розбиття  $\Delta r$  є найбільш відповідальним завданням.

Доведено, що допустимі похибки розбиття розрізу свердловини за буримістю мають бути в межах  $\Delta r = 0,25 \div 0,33$ . Отже, якщо множину  $\{r_i\}$  розглядати як сукупність параметрів, які характеризують будь-яке довбання, то як пачку однорідних за буримістю порід можна вважати інтервал глибин, який відповідає групі послідовних довбань, взятих з того самого класу з близькими коефіцієнтами  $r_i$ .

Проте точність визначення пачок однорідних за буримістю порід зростає із збільшенням кількості пачок, але при цьому пачки стають більш дрібними і, зрештою, задача розбиття вироджується. Тому відокремлення пачок з розмірами до 2,5 м є недоцільним з практичної точки зору, оскільки веде до незручностей при використанні їх під час керування процесом буріння. У зв'язку з тим, що процес руйнування породи буровим долотом відбувається одночасно із зношенням долота, запропоновано розглядати сукупність «долото – порода» як єдиний об'єкт контролю (рис. 1).

Стан об'єкта контролю запропоновано характеризувати параметрами стану долота

$$\vec{Z}^T(t) = [\mu(t), g(t)],$$

де:  $t$  – поточний час основного періоду роботи долота, який вимірюється від початку рейсу долота;  $\mu(t), g(t)$  – оцінки зносу оснащення і опор долота, а також оцінкою міцності гірських порід, якою обрали такий показник, як буримість порід  $f$ .

Запропоновано процес функціонування об'єкта контролю розглядати як послідовну зміну його станів, коли при переході від одного миттєвого стану до іншого значення  $\mu(t), g(t)$  загалом змінюються і є функціями стану і часу, а також характеристиками його стану. Оскільки гірська порода і долото зазнають впливу різноманітних зовнішніх чинників, але далеко не всі вони суттєві, то з множини зовнішніх впливів, які діють на об'єкт контролю, вибрані лише ті, що суттєво впливають на ефективність руйнування породи: вхідні керувальні дії

$$\vec{X}^T(t) = [F(t), n(t), Q(t)] \quad (4)$$

і апіорі відомі параметри долота

$$\vec{\alpha}^T = [d, n_{ш}, n_з],$$

де:  $F$  – осьова сила на долото;  
 $n$  – швидкість обертання долота;  
 $Q(t)$  – витрата промивального розчину;  
 $d$  – діаметр долота;  
 $n_{ш}$  – кількість шарошок;  
 $n_з$  – кількість зубців на шарошках.

Таблиця 1 – Значення оцінок буримості гірських порід для різних  $t$

Оцінка буримості гірських порід	Значення $m$	
	0	1
Функція зносу $\varphi(t)$	$1 - K_R t,$ $K_R = \frac{K_v}{v_0}.$	$e^{-K_v t}.$
Час буріння $t_k$	$\frac{v_0}{K_v} \left( 1 - \left( 1 - h_\phi \frac{2K_v}{v_0^2} \right)^{1/2} \right)$	$-\frac{1}{K_v} \ln \left( 1 - h_\phi \frac{K_v}{v_0} \right)$
Проходка $h_k$	$\frac{v_0^2}{2K_v} \left( 1 - \left( 1 - K_R t_\phi \right)^2 \right)$	$\frac{v_0}{K_v} \left( 1 - e^{-K_v t_\phi} \right)$
Питома енергія $E_N$	$\frac{K_e w}{\left( v_0 - \frac{K_v}{2} t_\phi \right) a d^2}$	$\frac{K_e w}{\frac{v_0}{t_\phi K_v} \left( 1 - e^{-K_v t_\phi} \right) a d^2}$

Оцінка буримості гірських порід	Значення $m$	
	2	3
Функція зносу $\varphi(t)$	$\frac{1}{1 + K_\varepsilon t},$ $K_\varepsilon = v_0 K_v.$	$\frac{1}{\sqrt{1 + K_q t}},$ $K_q = 2K_v v_0^2.$
Час буріння $t_k$	$\frac{1}{v_0 K_v} (e^{h_\phi K_v} - 1)$	$\frac{1}{2K_v v_0} \left( (h_\phi K_v v_0 + 1)^2 - 1 \right)$
Проходка $h_k$	$\frac{1}{K_v} \ln(K_v v_0 t_\phi + 1)$	$\frac{1}{K_v v_0} \left( \left( 2K_v v_0^2 t_\phi + 1 \right)^{1/2} - 1 \right)$
Питома енергія $E_N$	$\frac{K_e w}{t_\phi K_v} \ln(K_v v_0 t_\phi + 1)$	$\frac{1}{K_v v_0 t_\phi} \left( \left( 2K_v v_0^2 t_\phi + 1 \right)^{1/2} - 1 \right)$

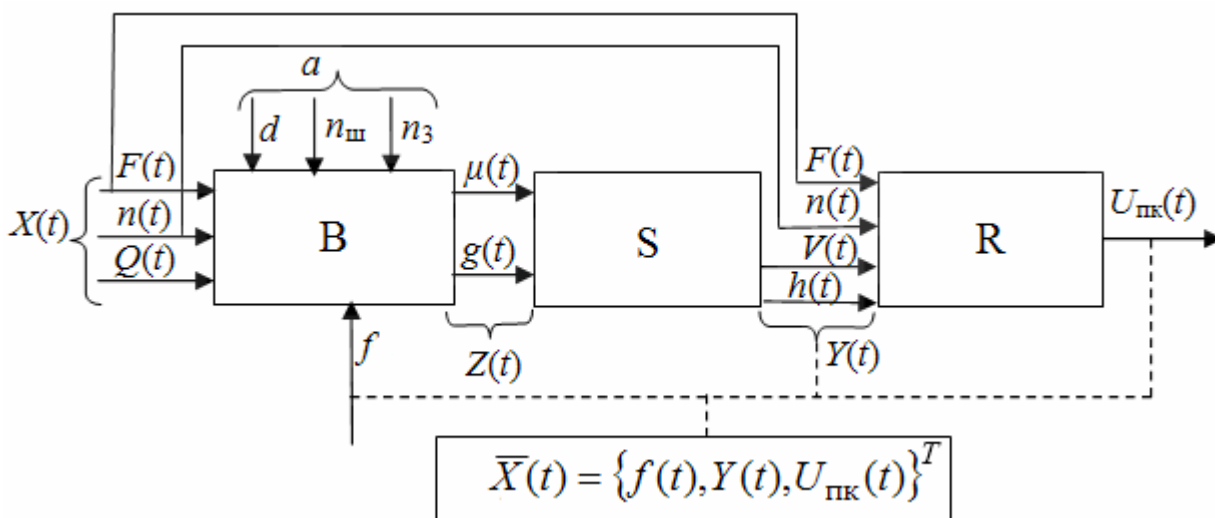


Рисунок 1 – Структурна схема процесу буріння свердловин як об'єкта контролю буримості в просторових координатах ( $\bar{X}_k(t)$  – контрольовані параметри)

Параметри стану долота  $Z(t)$  пов'язані з вхідними керувальними впливами  $X(t)$ , параметрами долота  $\alpha$  і буримістю порід  $f$  залежністю

$$Z_i(t) = B_i [\bar{X}(t), \alpha_i, f], \quad i = 1, 2, \dots, k,$$

де  $i$  – кількість доліт.

Вплив стану об'єкта контролю на показники процесу буріння запропоновано характеризувати значеннями його вихідних величин  $\bar{Y}^T$ : проходки долота  $h(t)$  і механічної швидкості буріння  $v(t)$ , тобто  $\bar{Y}^T(t) = \{h(t), v(t)\}$ . Кожна з вихідних величин визначається через параметри стану  $Z(t)$  своєю функціональною залежністю  $Y_j = S_j[Z(t)]$ ,  $j = 1, 2$ . Параметри контролю визначаються через вхідні і вихідні величини об'єкта  $\bar{U}_{\text{пк}} = R_l(\bar{X}(t), \bar{Y}(t), t)$ ,  $l = 1, \dots, 4$ .

Для обґрунтування вибору контрольованих величин визначили клас задачі контролю буримості гірських порід і в зв'язку з тим, що процес поглиблення свердловин є нестационарним випадковим процесом, що розвивається в часі, і між точками простору параметрів стану  $Z$  і простору спостережень  $Y$  немає однозначної відповідності, цей варіант контролю віднесено до визначення подій в умовах невизначеності. Основними джерелами невизначеності є змінні властивості гірських порід і технічного стану долота, а також спосіб контролю основних інформативних параметрів тощо. Отже, показник буримості гірських порід, який піддається безконтактному контролю, запропоновано визначати на базі комплексу контрольованих параметрів

$$f = M(\bar{Y}(t), \bar{X}(t)). \quad (5)$$

Попередній вибір найбільш суттєвих параметрів, що входять в функціонал (5), є неформальним, а розглянуті параметри не мають чіткого зв'язку з параметром буримості. Тому на наступному етапі досліджень було запропоновано скорегувати обсяг контролю з урахуванням методів контролю окремих параметрів, їх точності і вірогідності. При незмінному векторі керувальних дій побудовано узагальнену математичну модель механічної швидкості буріння (буримості гірських порід) у вигляді

$$v_0(t) = \varphi[\bar{X}(t), B(t), A(t)], \quad (6)$$

де  $B(t)$ ,  $A(t)$  – параметри, що характеризують геолого-технологічні умови буріння, а об'єкт дослідження представлено у вигляді перетворювача сигналів  $X(t)$  і  $f(t)$  у вихідний сигнал.

На основі додаткового аналізу процесу буріння нафтових і газових свердловин сформульоване твердження: якщо витрата промивальної рідини  $Q$ , віднесена до об'єму вибуреної за одиницю часу породи, перевищує деяку критичну величину, що характеризує повноту очищення вибою свердловини, то впливом промивальної рідини на досліджувану функцію (початкове значення механічної швидкості буріння  $v_0$ ) можна знехтувати. Отже, після введення додаткових умов використання математичної моделі, що містять тип оснащення долота і обмеження на мінімально допустиму витрату

рідини  $Q$ , одержали, що вихідна функція  $v_0$  залежить від  $F$ ,  $n$ ,  $d$  і потужності  $P$  на долоті. Між всіма цими параметрами існує деяка функціональна залежність  $\varphi(v_0, F, n, P, d) = 0$ , для розкриття якої перейшли від початкових розмірних координат до безрозмірних змінних  $i$ , скориставшись  $\pi$ -теоремою Букінгема, одержали одну безрозмірну комбінацію, від якої залежить остаточний розв'язок задачі:

$$\left( \frac{v_0 P}{F n^2 d^2} \right) = C = \text{const}, \quad (7)$$

де  $v_0, F, n, P, d$  – числові значення відповідних величин при деякому вибраному наборі основних одиниць фізичних величин.

З врахуванням виразу для потужності на долоті  $P = C_p F^\gamma \cdot n^\delta$ , де  $C_p$  – коефіцієнт, який враховує розмірність потужності,  $\gamma, \delta$  – невідомі показники степеня, що підлягають ідентифікації, отримали

$$v_0 = C_p d^2 F^{1-\gamma} n^{2-\delta}. \quad (8)$$

Права частина математичної моделі (8) є функцією керувальних дій, і її коефіцієнти підлягають ідентифікації в процесі буріння, яка повинна здійснюватись при переході долота в породи з іншою буримістю, і цей момент повинен бути виявлений за допомогою математичної моделі буримості гірських порід.

Запропоновано для визначення постійних складових у величинах  $F, n$  ввести до розгляду базові величини  $n_0, F_0$ :  $n(t) = n_0 + n(t)$ ,  $F(t) = F_0 + F(t)$ , де  $n(t), F(t)$  – стаціонарні в межах рейсу долота ергодичні випадкові процеси з нульовим математичним сподіванням.

Тоді узагальнена математична модель (8) набуде такого вигляду

$$v_0 = k F_0^\alpha n_0^\beta \left( 1 + \alpha \frac{F(t)}{F_0} + \beta \frac{n(t)}{n_0} \right), \quad (9)$$

де:  $k = C_p d^2$ ;  $\alpha = 1 - \gamma$ ;  $\beta = 2 - \delta$ .

Оскільки величина  $v_{\epsilon_0} = k F_0^\alpha n_0^\beta$  – це швидкість буріння, яка віднесена до вибою свердловини за умови, що осьова сила на долото вимірюється без похибок, тоді

$$\frac{v_0}{v_{\epsilon_0}} = 1 + \alpha \frac{F(t)}{F_0} + \beta \frac{n(t)}{n_0}. \quad (10)$$

Знайдемо математичне сподівання і дисперсію випадкової величини  $\frac{v_0}{v_{\epsilon_0}}$ . Оскільки

$$M[F(t)] = 0 \quad \text{і} \quad M[n(t)] = 0, \quad \text{то} \quad M\left[\frac{v_0}{v_{\epsilon_0}}\right] = 1 \quad \text{і}$$

$$\text{відповідно} \quad M\left[\left(\frac{v_0}{v_{\epsilon_0}} - 1\right)^2\right] = M\left[\left(\frac{v_0}{v_{\epsilon_0}}\right)^2\right] - 1.$$

Оскільки випадкові величини  $F(t)$  і  $n(t)$  некорельовані, тоді отримаємо

$$\sigma_{v_0}^2 = M \left[ \left( \frac{v_0}{\kappa_0} - 1 \right)^2 \right] = \alpha^2 \left( \frac{\sigma_F^2}{F_0} \right)^2 + \beta^2 \left( \frac{\sigma_n^2}{n_0} \right)^2, \quad (11)$$

де  $\sigma_F^2$  і  $\sigma_n^2$  – дисперсії випадкових величин  $F(t)$  і  $n(t)$ .

Якщо буріння ведеться в однорідному пласті і при постійних режимних параметрах, то  $\kappa_0 = const$ , з врахуванням раніше зроблених допущень, отримаємо

$$M[v_0] = \kappa_0, \\ \sigma_{v_0}^2 = \frac{1}{\kappa_0^2} \left( \alpha^2 \left( \frac{\sigma_F}{F_0} \right)^2 + \beta^2 \left( \frac{\sigma_n}{n_0} \right)^2 \right).$$

Таким чином, початкова швидкість буріння в середньому наближається до її дійсного значення, а дисперсія  $v_0$  залежить від співвідношення  $\sigma_F / F_0$  і  $\sigma_n / n_0$ .

Оскільки буримість гірських порід визначає величину добутку  $F_0 \cdot n_0$ , то для кожної породи існує певне оптимальне значення добутку  $F_0 \cdot n_0$  для досягнення високих показників роботи долота. Визначення раціонального сполучення осьової сили на долото  $F$  і швидкості його обертання  $n$  для конкретної гірської породи, як відомо, є найбільш важливою задачею оптимізації процесу буріння.

Отже, запропонована узагальнена математична модель (9) містить параметри, які піддаються вимірюванню в реальному часі, що дозволяє визначити цю характеристику гірських порід безконтактним методом за допомогою засобів автоматизованого контролю і застосувати її для систем адаптивного оптимального керування процесом буріння свердловин долотами нового покоління.

Проте, механічна швидкість буріння  $v_0$  достатньо ефективно і повно дозволяє оцінювати процес буріння і буримість гірських порід лише алмазними долотами (наприклад, типу PDC) і шарошковими долотами нового покоління, які забезпечують проходку на долото декілька тисяч метрів.

Для оцінки впливу зношування оснащення традиційного шарошкового долота на механічну швидкість буріння скористалися рівнянням  $v_0 = k_1 F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1}$  для механічної швидкості буріння незатупленим долотом. Для цього потужність роторного механізму бурової установки виразили через механічну швидкість буріння і питомі енерговитрати у такому вигляді:

при бурінні незатупленим буровим долотом  $F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1} = \left( \frac{1}{k_1} \right)_0 v_0$ ;

при бурінні затупленим буровим долотом  $F^{\alpha_1} n^{\beta_1} = \left( \frac{1}{k_1} \right)_v v$ ,

де:  $v$  – механічна швидкість при бурінні затупленим долотом;  $\left( \frac{1}{k} \right)_0, \left( \frac{1}{k} \right)_v$  – питомі енерговитрати при бурінні незатупленим і затупленим долотом.

Взявши відношення потужностей з урахуванням того, що буріння ведеться з постійною потужністю, тобто  $F^{\alpha_1} n^{\beta_1} = F_0^{\alpha_1} n_0^{\beta_1}$ , отримали

$$\frac{\left( \frac{1}{k_1} \right)_0 v_0}{\left( \frac{1}{k_1} \right)_v} = \frac{v_0}{\varphi(t)}, \quad (12)$$

де  $\varphi(t) = \frac{w}{w_0}$  – функція зношення оснащення шарошкового долота, яка є відношенням поточних питомих енерговитрат  $w$  до питомих енерговитрат  $w_0$  при бурінні незатупленим долотом. Як видно з рівняння (12), цей показник може бути визначений і як відношення механічної швидкості буріння  $v_0$  незатупленим долотом до поточного значення механічної швидкості  $v$ , тобто

$$\varphi(t) = v_0 v^{-1}. \quad (13)$$

Значення  $\varphi(t)$  може приймати неперервний ряд значень від  $\varphi(t) = 1$  до  $\varphi(t) = \infty$ . При цьому  $\varphi(t) = 1$  відповідає фізичне зношування оснащення долота рівний нулю, а  $\varphi(t) = \infty$  – повне зношення оснащення.

Швидкість зношення оснащення шарошкового долота пропорційна швидкості зростання питомих енерговитрат  $\frac{d\varphi(t)}{dt} = w_0^{-1} \frac{dw}{dt}$ , або швидкості падіння механічної швидкості буріння  $\frac{d\varphi(t)}{dt} = v_0 \frac{d(v^{-1})}{dt}$ .

Ступінь зношення оснащення шарошкового долота можна оцінити також за темпом падіння механічної швидкості буріння:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{v_t} = \frac{\varphi(t)}{v_0}. \quad (14)$$

Показник  $\varepsilon_y$  в процесі поглиблення свердловини приймає значення від  $\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} = \frac{1}{v_0}$  до

$\varepsilon_y = \infty$  при  $v \rightarrow 0$ . Похідна від цього показника з урахуванням (14) дорівнює

$$\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{d(v^{-1})}{dt} = \frac{d\varphi(t)}{v_0 dt}. \quad (15)$$

Якщо врахувати значення  $\varphi(t)$ , які наведені в табл. 2, то можна визначити величини  $\varepsilon_y, d\varphi/dt, d\varepsilon_y/dt$  (табл. 2).

Таблиця 2 – Значення величин  $\varepsilon_y$ ,  $d\varphi/dt$ ,  $d\varepsilon_y/dt$

Значення t	$\varepsilon_y = \frac{\varphi(t)}{v_0}$	$\frac{d\varphi}{dt}$	$d\varepsilon_y/dt$
0	$\frac{1}{v_0} \cdot \frac{1}{1-K_R t}$	$\frac{K_R}{(1-K_R t)^2} \cdot \frac{1}{v_0}$	$\frac{K_R}{(1-K_R t)^2}$
1	$\frac{e^{K_v t}}{v_0}$	$\frac{K_v}{v_0} e^{K_v t}$	$K_v e^{K_v t}$
2	$\frac{1}{v_0} \cdot (1+K_\varepsilon t)$	$\frac{K_\varepsilon}{v_0}$	$K_\varepsilon$
3	$\frac{1}{v_0} \cdot \sqrt{1+K_q t}$	$\frac{K_q}{v_0} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1+K_q t}}$	$\frac{K_q}{2 \cdot \sqrt{1+K_\varepsilon t}}$

На основі аналізу показників зношення доліт зроблено висновок, що, якщо механічна швидкість буріння змінюється за гіперболічним законом, тобто  $\varphi(t) = 1+K_\varepsilon t$ , тоді за показником  $K'_\varepsilon = \frac{d\varphi(t)}{dt}$  можна оцінювати абразивність гірських порід. Величину  $\frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{K_\varepsilon}{v_0}$  позначимо як  $K_y = \frac{K_\varepsilon}{v_0}$ .

Для оцінки ефективності процесу поглиблення свердловин запропоновано похідну відносного зношення оснащення долота  $\varepsilon$  за проходкою долота  $h$ , тобто інтенсивність відносного зношення оснащення долота, яка для гіперболічної моделі швидкості проходки набуде такого значення:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = \frac{dt}{dh} = \frac{K_\varepsilon}{v} \quad \text{або} \quad \frac{d\varepsilon}{dh} = \frac{K_\varepsilon}{v_0} \varepsilon = K_y \varepsilon. \quad (16)$$

На початку рейсу долота, коли оснащення долота ще не затуплене,  $\varepsilon = 1$  і

$$\left. \frac{d\varepsilon}{dh} \right|_{t=0} = \frac{K_\varepsilon}{V_0} = K_y. \quad (17)$$

Значення оцінки зношення оснащення долота  $\frac{d\varepsilon}{dh}$  при  $t = 0$  тим менше, чим менша швидкість зміни умовного зношення оснащення долота  $K_i$ . Слід зазначити, що залежність (17) визначається буримістю гірської породи, її абразивними властивостями, типорозміром бурового долота і керувальними діями.

При бурінні в однорідних породах за постійних параметрів режиму буріння ( $F = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ ,  $Q = \text{const}$ ) оцінка відносного зносу долота в основний період його роботи змінюється за лінійним законом  $\varepsilon(t) = \frac{w(t)}{w_0} = 1 + K_\varepsilon t$ ,

або  $\varepsilon_y(t) = \frac{1}{v_0(t)} = \varepsilon_{y0} \varepsilon(t)$ , де  $\varepsilon_{y0} = \frac{1}{v_0}$ . Як що в межах досліджуваного інтервалу глибини свердловини поточні середні значення оцінки швидкості відносного зношення оснащення долота  $K_\varepsilon$  і оцінки інтенсивності відносного зношення оснащення долота  $K_i$  незмінні, то відповідну пачку гірських порід можна вважати однорідною за буримістю. Отже показник  $K_y = \frac{K_\varepsilon}{v_0}$  фактично є коефіцієнтом, який характеризує буримість гірських порід для даного типу долота, тобто є коефіцієнтом буримості. Із збільшенням глибини свердловини коефіцієнт буримості  $K_\delta$  також зростає, оскільки початкове значення механічної швидкості буріння  $v_0$  змінюється за рахунок того, що буримість гірських порід погіршується.

Запропонована методика визначення коефіцієнта буримості гірських порід може бути реалізована при будь-яких варіантах зміни в часі механічної швидкості буріння при використанні шарошкових доліт. Що стосується доліт типу PDC, то в зв'язку з тим, що для них

$\varepsilon = \frac{v_0}{v_t} = 1$ , визначення зміни буримості гірських порід і виявлення однорідних пачок порід може бути здійснене на базі контролю поточно-го значення механічної швидкості буріння.

Висунута гіпотеза і сформульовані допущення дали змогу в результаті аналізу математичних моделей встановити, що під час буріння в однорідному за буримістю інтервалі гірських порід, коли керувальні впливи  $F = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$ , буримість гірських порід можна оці-

нити опосередкованою функцією  $v_0 = \frac{v_t}{\psi(t)}$ ,  $\psi(t)$  – функція, яка характеризує зношення оснащення долота. Ця функція, що визначається з табл. 2, залежить від типу вибраної моделі.

Запропоновано як базове значення механічної швидкості буріння обрати ту механічну швидкість, яка визначається на початку буріння алмазним долотом або незатупленим шарошкочним долотом з оптимальними керувальними діями.

**IV Висновок.** Вперше запропоновано теоретичні засади методу ідентифікації та безконтактного автоматизованого контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин, що дає змогу виділяти інтервали однокривої буримості у свердловині і визначити координатні збурення, що діють на систему адаптивного оптимального керування.

### *Література*

- 1 Горбійчук М.І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин: [навчальний посібник] / М.І. Горбійчук, Г.Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2003. – 493 с.
- 2 Семенцов Г.Н. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій та газовій промисловості: [навчальний посібник] / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Когуч, Я.В. Куровець, М.М. Дранчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 327 с.
- 3 Семенцов Г.Н. Основи моніторингу технологічних об'єктів нафтогазової галузі: [навчальний посібник] / Г.Н. Семенцов, М.М. Дранчук, О.В. Гутак, Я.Р. Когуч, М.І. Когутяк, Я.В. Куровець. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 808 с.
- 4 Семенцов Г.Н. Визначення буримості гірських порід шляхом вимірювання параметрів і показників процесу буріння / Г.Н. Семенцов, Н.В. Сабат // Науковий вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №1. – С.181-186.
- 5 Когуч Я.Р. Вимоги до математичної моделі буримості гірських порід з позицій автоматичного контролю / Я.Р. Когуч, Н.В. Сабат // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2004. – №1(7). – С.49-53.
- 6 Сабат Н.В. Метод контролю буримості гірських порід в процесі поглиблення свердловин / Н.В. Сабат // Академический вестник. – Кривой Рог. – 2007. – № 19. – С.52-53.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
12.05.11  
Рекомендована до друку професором  
В. М. Юрчишином*