

УДОСКОНАЛЕНА КІБЕРНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОГЛИБЛЕННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Г.Н.Семенцов, О.В.Фадєєва

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

kafatp@ac.nung.edu.ua

Технологический процесс бурения рассматривается как сложная нелинейная система с большим количеством входов и выходов. В статье показано новое решение проблемы моделирования процесса углубления скважин.

Drilling of borehole can be represented as on certain non-linear multi-input, multi-output sistem. This paper shows a new solution of the simulation problems of well-drilling process.

Моделювання процесу поглиблення свердловин як складного об'єкта, що функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом завад, є актуальним науково-практичним завданням у зв'язку з широким впровадженням в галузі комп'ютерно-інтегрованих технологій, нових типів вискоєфективних доліт та інших технічних засобів.

Проте аналіз літературних джерел (наприклад, [1, 2, 5, 7 та ін.]) свідчить про недостатній об'єм проведених досліджень у напрямку удосконалення кібернетичних моделей технологічного процесу поглиблення нафтових і газових свердловин.

Тому метою даної роботи є аналіз взаємозв'язків параметрів і показників технологічного процесу поглиблення свердловин і на цій основі удосконалення кібернетичної моделі цього процесу, зокрема, обґрунтування критерію оптимальності (мінімуму питомих витрат енергії), який, на відміну від загальновідомих, є функціоналом не кінцевого, а поточного стану керованого об'єкта.

Запропоновано технологічний процес поглиблення нафтових і газових свердловин розглядати як багатомірний керований об'єкт, який розвивається в часі і функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом суттєвих зовнішніх збурень.

Під впливом вектора керування

$$\bar{U}(t) = U[\bar{F}(t), \bar{n}(t), \bar{Q}(t)] \quad (1)$$

стан керованого об'єкта змінюється і характеризується вектором стану

$$\bar{X}(t) = X[\bar{h}(t), \bar{\mu}(t), \bar{g}(t)], \quad (2)$$

де: $F(t)$ – осьове навантаження на бурове долото;

$n(t)$ – швидкість обертання бурового долота;

$Q(t)$ – витрата бурового розчину;

$h(t)$ – проходка на долото;

$\mu(t)$ – спрацювання оснащення бурового долота;

$g(t)$ – спрацювання опор бурового долота.

Виходячи з вимог спостережливості і вимірюваності, координати вектора $\bar{X}(t)$ розділили на дві підгрупи: $\bar{X}_1(t)$ – показники, які

можливо вимірювати в режимі on-line, $\bar{X}_2(t)$ – показники процесу, які вимірюються в режимі off-line.

Взаємозв'язок між вхідними і вихідними змінними керованого об'єкта, який відповідає усталеному режиму роботи бурової установки і обмеженому відрізку часу Δt , можна представити у такому вигляді:

$$\bar{X}(t) = f[\bar{U}(t), \bar{Z}(t)], \quad (3)$$

де: $\bar{X}(t)$ – вектор стану керованого об'єкта,

$\bar{U}(t)$ – вектор керування,

$\bar{Z}(t)$ – вектор зовнішніх некерованих впливів.

Поточні середні значення складових вектора $\bar{Z}(t) = Z(z_1(t), z_2(t), \dots, z_i(t))$ у загальному випадку не є постійними. Вони змінюються зі збільшенням глибини свердловини, і, отже, в часі.

Нестаціонарність процесу поглиблення свердловини зумовлена також і не постійністю технічного стану оснащення і опор бурового долота. У міру зношення долота вихідні параметри $\bar{X}(t)$ керованого об'єкта змінюються. З урахуванням цього факту рівняння зв'язку (3) при поглиблення свердловини в декількох однорідних пачках породи можна записати так:

$$\bar{X}_j(t_k) = f_{oj}[\bar{U}(t), \bar{Z}_j(t)] \phi[\bar{U}(t), \bar{Z}_j(t), t_k], \quad j=1,2,3,\dots \quad (4)$$

Рівняння (4) є математичною моделлю процесу поглиблення загального виду, яка відповідає j -ій пачці гірських порід, у середньому однорідній за буримістю.

Вона являє собою добуток двох функцій: перша відображає в m -мірному просторі керуючих впливів $[U_1, U_2, \dots, U_m]$ сукупність гіперповерхонь, яка відповідає початковому технічному стану незатупленого бурового долота; друга характеризує зміни показників процесу поглиблення в часі t_k , які пов'язані зі зміною технічного стану бурового долота, тобто, це функції спрацювання оснащення долота.

Відносно функції спрацювання можна виділити долота з твердосплавним вставним і алмазним незатуплюючим оснащенням, якщо

$$\varphi = \varphi[\bar{U}(t), \bar{Z}(t), t_k] = 1,$$

і з фрезерованим затуплюючим оснащенням, якщо

$$\varphi = \varphi[\bar{U}(t), \bar{Z}(t), t_k] \geq 1.$$

Виходячи із сучасного стану в області моделювання технологічного процесу поглиблення свердловин, встановлено, що відсутність перевірки функції спрацювання і недостатня вивченість взаємозв'язків спрацювання долота з показниками процесу поглиблення привели до того, що математичні моделі технологічного процесу поглиблення нафтових і газових свердловин мають вузьку область застосування і не придатні для оперативного керування внаслідок наявності в них невимірюваного параметру – спрацювання бурового долота. До недоліків математичних моделей, отриманих різними дослідниками, як правило, на базі результатів лабораторних і промислових досліджень слід віднести емпіризм, малопараметричність моделей, невідповідність розмірностей, а також незадовільну точність.

Встановлено [1], що для керування зручно і доцільно математичну модель технологічного процесу поглиблення свердловин шукати у вигляді диференціальних рівнянь такого вигляду:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\varepsilon^*} V_0(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

$$\frac{d\varepsilon^*}{dt} = C(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (6)$$

де: x_1, x_2, \dots, x_n – технологічні і гірничо-геологічні параметри, від яких залежить механічна швидкість буріння V_0 незатупленим буровим долотом;

ε^* – відносне зношення оснащення бурового долота;

C – швидкість зношення оснащення бурового долота, яка як і початкова механічна швидкість буріння V_0 , невідома і залежить від x_1, x_2, \dots, x_n .

Враховуючи всі ці фактори (технологічні параметри процесу поглиблення, фізико-механічні і абразивні властивості гірських порід, ступінь очищення вибою свердловини, типорозмір долота та ін.), отримати аналітичні вирази для залежностей V_0 і C при існуючому рівні розвитку теорії руйнування гірських порід неможливо. Проте, оскільки процеси руйнування гірської породи, зношення оснащення і опір бурового долота є однотипними фізичними процесами, то слід сподіватись, що функція V_0 і C будуть мати однакову математичну структуру, але кількісна відмінність їх буде в різних значеннях параметрів математичних моделей.

Аналіз умов поглиблення свердловини дав можливість зробити висновок, що основними технологічними параметрами, від яких залежить функція V_0 , є осьове навантаження на долото F , швидкість обертання долота n , потужність обертання долота N , витрата промиваль-

ної рідини Q , діаметр долота d і тип його оснащення. Оскільки тип оснащення долота – дискретний параметр, то його включили в умови застосування моделі.

На основі додаткового аналізу технологічного процесу поглиблення свердловин сформульовано ще одне твердження: якщо витрата промивальної рідини, віднесена до об'єму вибуреної в одиницю часу гірської породи, перевищує деяку критичну величину, яка характеризує повноту очищення вибою свердловини, то впливом витрати промивальної рідини на шукану функцію V_0 можна знехтувати. Отже, вводячи додаткові умови застосування моделей, що включають і обмеження на мінімально допустиму витрату промивальної рідини, одержали, що шукана функція V_0 залежить від F, n, d, N . Між усіма цими величинами, згідно з теорією розмірностей [2], існує деякий функціональний зв'язок, який можна записати у вигляді рівності

$$f = (V_0, F, n, d, N) = 0.$$

Для розкриття цього функціонального зв'язку перейдемо від початкових розмірних координат до безрозмірних. Оскільки, осьове навантаження на долото, момент обертання долота і потужність, яка з нього знімається, є векторними величинами, то природно, аналіз розмірностей проводиться з урахуванням цього фактора. Для цього введемо систему координат x, y, z так, щоб вісь z була направлена вздовж стовбура свердловини, а площина $x-y$ – перпендикулярно до стовбура свердловини (вертикальної, похило спрямованої або горизонтальної). Тоді розмірності вихідних змінних в цій системі координат будуть такими:

$$[V] = \frac{L_z}{T}; [F] = \frac{mL_z}{T^2}; [n] = \frac{1}{T};$$

$$[d] = \sqrt{L_x, L_y}; [N] = \frac{mL_x, L_y}{T^3},$$

де: L_x, L_y, L_z – розмірності довжини по координатах x, y, z відповідно,

T, m – розмірності часу і маси.

Складемо з показників розмірностей зведену таблицю 1.

Здійснивши послідовне виключення розмірностей довжин L_x, L_y, L_z , часу T і маси m [2], в результаті одержали одну безрозмірну змінну, від якої залежить остаточно розв'язок задачі, у вигляді такої комбінації вихідних даних:

$$\pi = \frac{V_0 N}{F n^2 d^2}. \quad (7)$$

Це означає, що вихідну залежність можна описати рівнянням виду $f_1(\pi) = 0$, розв'язавши його відносно π , одержимо:

$$V_0 = c_1 \frac{F n^2 d^2}{N}, \quad (8)$$

де: $\pi = c_1$, c_1 – невідома змінна, яка повинна визначатися в процесі ідентифікації,

Таблиця 1 — Зведена таблиця показників розмірностей

Технологічні параметри / Розмірності	N	F	n	V_0	d	$\frac{N}{d^2}$	$\frac{F}{V_0}$	$\frac{NV_0}{d^2 F}$
L_x	1				1/2			
L_y	1				1/2			
L_z		1		1				
T	-3	-2	-1	-1		-3	-1	-2
m	1	1				-1	1	

$N = F^\gamma, n^\delta$ – потужність обертання долота, яка витрачається на руйнування породи вибою свердловини,

γ, δ – показники степеня при F і n .

Отже, потужність обертання долота N , яка витрачається на руйнування гірської породи вибою свердловини залежить від осевого навантаження на бурове долото F і швидкості обертання долота n , причому ця залежність визначається не тільки фізико-механічними і абразивними властивостями розбурюваних гірських порід, але й механічною характеристикою привода долота $n=f(M)$, де M – крутний момент на долоті.

Підставляючи вираз для потужності в (8), одержимо

$$V_0 = c_1 F^{(1-\gamma)} n^{(2-\delta)} d^2, \quad (9)$$

або

$$V_0 = k_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \quad (10)$$

де $k_1 = c_1 d^2$; $\alpha_1 = 1 - \gamma$; $\beta_1 = 2 - \delta$.

Підставивши (10) в рівняння (5), і ввівши безрозмірний час $\tau = nt$, одержимо:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{1}{\varepsilon^*(\tau)} k_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}. \quad (11)$$

Розглянемо тепер праву частину рівняння (6). Для цього скористаємося тим же методом аналізу розмірностей. Міркуючи аналогічно до попереднього, приходимо до наступної вихідної постановки задачі: за умови, що витрата промивальної рідини задовольняє раніше сформульовану умову, а тип оснащення долота є додатковою умовою застосування моделі, швидкість зношування долота $\frac{dh}{dt}$ залежить від технологічних параметрів F, n, d, N .

Перейшовши до безрозмірної системи координат, задачу знаходження взаємозв'язків між усіма цими змінними зведемо до розкриття функції повного зв'язку

$$f_2(\pi_2, \pi_3) = 0; \quad \pi_2 = \frac{1}{n} \frac{d\varepsilon}{dt}; \quad \pi_3 = \frac{Fnd}{N}. \quad (12)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно першої змінної і вводячи безрозмірний час $\tau = nt$, одержимо:

$$\frac{d\varepsilon^*}{d\tau} = f_3(\pi_3), \quad \pi_3 = \frac{Fnd}{N}. \quad (13)$$

Розкрити функцію (13) із загальних міркувань неможливо. Можна тільки параметризува-

ти її, запропонувавши певний клас апроксимуючих функцій, наприклад, ряди з невідомими показниками степенів. У цьому випадку досліджувана функція подається у такому вигляді:

$$f_3(\pi_3) \approx \sum_{i=1}^m \alpha_i^* (\pi_3)^{\beta_i^*}, \quad (14)$$

де α_i^*, β_i^* – невідомі коефіцієнти, які повинні бути визначені в процесі ідентифікації моделі.

Найбільш простий результат одержуємо при одночленній апроксимуючій формулі, тобто при $m = 1$. У цьому випадку з (13) і (14) одержимо:

$$\frac{d\varepsilon^*}{d\tau} = \alpha_1^* \left(\frac{Fnd}{N} \right)^{\beta_1^*}, \quad (15)$$

де α_1^*, β_1^* – коефіцієнти моделі.

Підставляючи в (15) вираз для потужності обертання долота N , одержимо:

$$\frac{d\varepsilon^*}{d\tau} = \alpha_1^* d^{\beta_1^*} F^{(\beta_1^* - \gamma_1 \beta_1^*)} n^{(\beta_1^* - \delta \beta_1^*)}, \quad (16)$$

або

$$\frac{d\varepsilon^*}{d\tau} = k_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2}, \quad (17)$$

де $k_2 = \alpha_1^* d^{\beta_1^*}$; $\alpha_2 = (\beta_1^* - \gamma_1 \beta_1^*)$; $\beta_2 = (\beta_1^* - \delta \beta_1^*)$.

Об'єднавши (11) і (17), отримали клас моделей процесу поглиблення свердловин у вигляді такої системи диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\varepsilon^*}{d\tau} = \frac{1}{\varepsilon^*(\tau)} k_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \quad (18)$$

$$\frac{d\varepsilon^*}{d\tau} = k_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2}.$$

Аналіз свідчить, що праві частини математичної моделі (18) є випадковими і її коефіцієнти підлягають ідентифікації в процесі поглиблення свердловин. Ідентифікація повинна здійснюватися при переході долота в гірські породи з іншими фізико-механічними і абразивними властивостями. Цей момент повинен бути виявлений за допомогою показників зношення бурового долота, які входять в математичну модель і залежать від зміни властивостей гірських порід.

Досліджені методи оцінювання спрацювання оснащення бурових доліт на базі інформації

про механічну швидкість буріння. Запропоновано [3] оцінювати спрацювання оснащення долота показником, який отримав назву оцінка відносного зносу оснащення бурового долота $\varepsilon = V_0 V_t^{-1}$, де V_t, V_0 – поточне і початкове значення механічної швидкості буріння. Цей показник безрозмірний і піддається вимірюванню в режимі on line.

Детально вивчено [1] процес зношення зубців доліт і встановлено функціональний зв'язок показника ε з фізичним спрацюванням:

$$\varepsilon = (1 + m\mu)^2, \quad (19)$$

де m – коефіцієнт, який залежить від геометрії зубців і форми спрацювання.

Зміні μ в межах $\mu \in [0;1]$ відповідає зміна ε в діапазоні $\varepsilon \in [1; (1+m)^2]$. Встановлено також і експериментально підтверджено, що взаємозв'язок (19) є інваріантним відносно властивостей гірських порід і типорозмірів бурових доліт. Це дає можливість оцінювати знос оснащення бурових доліт, користуючись показником ε .

Базуючись на цьому, розроблена математична модель технологічного процесу поглиблення свердловини, в якій всі параметри піддаються вимірюванню в режимі on line:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= \varepsilon^{-1} V_0(\bar{U}, \bar{A}_1); \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= K_\varepsilon(\bar{U}, \bar{A}_2); \\ \frac{dg}{dt} &= K_g(\bar{U}, \bar{A}_3). \end{aligned} \quad (20)$$

Математична модель (20) описує роботу бурового долота на вибої свердловини в трьохмірному просторі станів: h (проходка), ε (оцінка відносного спрацювання оснащення долота), g (оцінка відносного спрацювання опор долота).

На базі аналізу фізичної сутності технологічного процесу поглиблення свердловин сформульовані граничні умови:

- на початку рейсу долота проходка $h(0)$, оцінка відносного зносу оснащення долота $\varepsilon(0)$ і знос опор $g(0)$ приймають такі значення (початкові умови):

$$h(0)=0; \varepsilon(0)=1; g(0)=0 \text{ при } t=0, \quad (21)$$

- а в кінці рейсу долота – такі значення:

$$h(t_\delta) \geq 0; 1 \leq \varepsilon(t_\delta) \leq (1+m)^2; 0 \leq g(t_\delta) \leq 1 \text{ при } t = t_\delta; \quad (22)$$

а також технологічні обмеження:

$$F_{min} \leq F \leq F_{max}; n_{min} \leq n \leq n_{max}; Q = const; V_{cn} \leq (V_{cn})_{max}; M_g \leq (M_g)_{max}, \quad (23)$$

V_{cn} – швидкість спуско-підймальних операцій;

M_g – момент на долоті.

При цьому слід враховувати, що в (20) механічна швидкість буріння незатупленим долотом V_0 , швидкість відносного спрацювання оснащення долота K_ε і швидкість відносного

спрацювання опор долота K_g залежать від вектора \bar{U} параметрів режиму буріння $\bar{U} = \{F, n, Q\}$

та від векторів $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$ властивостей системи “долото – гірська порода”.

Конкретний вигляд, який приймають праві частини рівнянь (20), визначаються властивостями розбурюваних гірських порід, конструкцією бурового долота, а також умовами буріння.

Аналіз промислових даних, одержаних при бурінні понад 50 свердловин на Прикарпатті і на родовищах Дніпровсько-Донецької западини, дав змогу встановити, що при ефективному очищенні вибою свердловини від шламу в різних геолого-технологічних умовах початкове значення механічної швидкості буріння задовільно описується рівнянням

$$V_0(\bar{U}, \bar{A}_1) = K_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \quad (24)$$

де α, β, K – параметри, які залежать від конкретних умов буріння і конструкції бурового долота.

Швидкість зміни оцінки відносного спрацювання оснащення долота також залежить від параметрів режиму буріння і від властивостей системи “долото – гірська порода”. Як засвідчили наші дослідження [4], при $Q = const$, цей зв'язок має нелінійний характер і описується рівнянням

$$K_\varepsilon(\bar{U}, \bar{A}_2) = K_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2}, \quad (25)$$

де α_2, β_2, K_2 – параметри моделі, які залежать від конструкції бурового долота і умов буріння.

Аналогічне рівняння отримаємо і для швидкості зміни відносного спрацювання опор долота:

$$K_g(\bar{U}, \bar{A}_3) = K_3 F^{\alpha_3} n^{\beta_3}, \quad (26)$$

де α_3, β_3, K_3 – параметри моделі, які підлягають ідентифікації а конкретних умовах буріння.

Отже, математичну модель технологічного процесу поглиблення свердловини можна представити у вигляді сукупності таких трьох диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= \frac{k_1 F^{\alpha_1} n^{\beta_1}}{\varepsilon}; \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= k_2 F^{\alpha_2} n^{\beta_2}; \\ \frac{dg}{dt} &= k_3 F^{\alpha_3} n^{\beta_3} \end{aligned} \quad (27)$$

з граничними умовами (21), (22) і технологічними обмеженнями (23), зумовленими можливостями технологічного обладнання, граничною потужністю, навантаженням на долото і кінцевою потужністю, яка підводиться до вибою свердловини.

В [5, 6] наведені математичні моделі, одержані експериментально різними способами в різних геолого-технологічних умовах. Проте, всі ці моделі можуть бути приведені до вигляду (27).

Найбільшу увагу приділяють першому рівнянню математичної моделі (27). Проте більшість авторів не наводить значення коефіцієнта K_1 , що ускладнює аналіз взаємозв'язків його з

характеристиками гірських порід і параметрами режиму буріння.

Аналіз числових значень показників α_I і β_I свідчить, що дослідники США, ґрунтуючись на даних промислових досліджень, дають різні значення α_I і β_I [7]:

Ван-Лінген — $\alpha_I=1,25$; $\beta_I=0,8$;

Вудс — $\alpha_I=1,1-2,4$; $\beta_I=1$;

Вардрун-Каннон — $\alpha_I=1$; $\beta_I=0,4$;

Енкель-Більштейн-Каннон — $\alpha_I=1$; $\beta_I=0,5$;

Мур — $\alpha_I=1$; $\beta_I=1$.

Це свідчить про те, що технологічні моделі названих авторів відображають процес поглиблення свердловини лише в умовах експерименту і непридатні для застосування в інших умовах, і пояснюється не тільки різними технологічними умовами поглиблення свердловини, але й застосуванням різних типорозмірів доліт, буріння якими здійснюється на неоднакових глибинах. Проте, навіть у випадку буріння свердловини на одній і тій же глибині і однотипним породоруйнівним інструментом механічні характеристики привода долота відрізняються між собою внаслідок неточностей, допустимих при виготовленні, а це призводить до того, що коефіцієнти математичних моделей k_I , α_I , β_I не можна вважати постійними навіть для схожих умов буріння.

Отже, враховуючи, що коефіцієнти α_I і β_I апіорі невідомі і апостеріорні значення їх коливаються в межах $\alpha_I \in [1; 2,4]$, $\beta_I \in [0,4; 1]$, розглянемо фізичну суть коефіцієнта k_I .

Для цього проаналізуємо розмірності всіх складових рівняння

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k_I \cdot F^{\alpha_I} \cdot n^{\beta_I}}{\varepsilon}, \quad (28)$$

а саме: $\left[\frac{dh}{dt} \right] = \frac{M}{c}$ – механічна швидкість буріння,

$$\left[F^{\alpha_I} n^{\beta_I} \right] = \frac{Дж}{c} \text{ – механічна потужність,}$$

яка підведена до долота;

$$[\varepsilon] = \left[\frac{v_0}{v} \right] \text{ – безрозмірна величина.}$$

Тоді будемо мати:

$$\frac{M}{c} = [k_I] \frac{Дж}{c}.$$

Звідки розмірність коефіцієнта

$$[k] = \frac{M \cdot c}{c \cdot Дж} = \frac{M}{Дж}. \text{ Тобто коефіцієнт } k_I \text{ характе-}$$

ризує величину проходки на одиницю витраченої на руйнування гірської породи енергії. Більш зручним є представлення коефіцієнта k_I у

$$\text{вигляді } w = \frac{1}{k_I} \cdot \frac{Дж}{M}, \text{ який характеризує пито-}$$

мі витрати енергії на 1м проходки свердловини. Тоді рівняння (28) буде мати такий вигляд:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{w} \cdot \frac{F^{\alpha_I} n^{\beta_I}}{\varepsilon} \quad (29)$$

Якщо механічну потужність $F^{\alpha_I} n^{\beta_I}$ вимірювати в кВт, то тоді показник w має розмірність $\left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{M} \right]$:

$$w = \frac{F^{\alpha_I} n^{\beta_I}}{\varepsilon \cdot dt / dh} = \frac{F^{\alpha_I} n^{\beta_I}}{\varepsilon \cdot ph}; \left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{M} \right], \quad (30)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор перетворення за Лапласом.

При бурінні алмазними долотами зі сталевим корпусом, наприклад типу БИТ 295,3 М виробництва “НПІ Буриртех” [8] які забезпечують проходку на долото до 6000 м, або долотами, оснащеними твердосплавними вставками, наприклад, Ш 215, 9с 3-ГАУ, розробки ЗАТ “НДІКБ бурового інструменту” [9], тобто незатуплюючим породоруйнівним інструментом, показник $\varepsilon = 1$.

Тоді рівняння (30) спрощується до такого вигляду:

$$w = \frac{F^{\alpha_I} n^{\beta_I}}{ph}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{M} \quad (31)$$

або

$$w = \frac{F^{\alpha_I} n^{\beta_I} \Delta t}{\Delta h}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{M} \quad (32)$$

Особливістю рівняння (32) є те, що воно дає змогу визначати питомі витрати енергії в реальному часі засобами контролю параметрів і показників процесу буріння: F , n , h .

Це спрощує задачу ідентифікації параметрів моделі (28) у зв'язку з тим, що коефіцієнт k_I – контролюється в режимі on-line і в моделі (29), підлягають ідентифікації лише параметри $\alpha_I \beta_I$. Крім цього, показник (32) може бути використаний як критерій оптимальності процесу поглиблення свердловини

$$w_i(x) \rightarrow \min_{x \in S}, \quad (33)$$

де

$$S = \left\{ \begin{array}{l} (F_i, n_i)_{i=1, \dots, N}; \quad F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}; \\ n_{\min} \leq n_i \leq n_{\max}; \quad \sum_{i=1}^N h_i = H; \quad h_i \geq 0 \end{array} \right\};$$

F_i, n_i – осьове навантаження на долото і швидкість його обертання в i -рейсі.

Це можливе тому, що існує деякий режим буріння $F = F_{w_{opt}}$ і $n = n_{w_{opt}}$, при якому функція $w = w(F, n) \rightarrow \min$.

Забезпечення мінімуму функції (33) дає змогу одночасно досягти мінімальної інтенсивності зношення оснащення долота і максимально можливої продуктивності буріння. Енергоємність процесу поглиблення в цьому випадку зумовлена лише питомою енергоємністю гірської породи, яка визначається за допомогою формули (33).

Суттєвою перевагою критерію (33) є можливість його безпосереднього контролю в процесі поглиблення свердловини. При цьому оптимальний режим буріння, який відбувається за умов апріорної та поточної невизначеності під впливом суттєвих завад (спрацювання оснащення долота, випадкові зміни фізико-механічних і абразивних властивостей гірських порід, порушення досконалої промивки вибою та ін.) сприяє досягненню також максимально можливої проходки на долото.

Отже, неперервний контроль питомих втрат енергії (33), які можна розглядати як питому енергоємність процесу поглиблення свердловини, забезпечує вирішення задачі підтримання оптимального режиму поглиблення свердловини в реальному часі.

При переході бурового долота із однієї літологічно однорідної пачки порід в іншу спостерігається зміна величини питомих енерговтрат w , оскільки змінюється питома енергоємність гірських порід. Цей факт може бути використаний для розчленування геологічного розрізу за питоною енергоємністю руйнування гірських порід.

Проте, для визначення величини питомих енерговитрат w за формулою (31) або (32) слід застосовувати методи fuzzy-logic, оскільки параметрам, що входять в вираз для w , властива невизначеність, джерелами якої є:

- суттєві відхилення поточних значень осьового навантаження на долото, швидкості обертання долота і моменту на долоті від середніх значень;
- характер зміни механічної швидкості буріння в часі;
- недостатня ефективність очистки вибою свердловини від шламу;
- коливання температури в зоні контактів зубців шарошки з гірською породою;
- нелінійний характер зношення оснащення і опор долота в процесі поглиблення;
- спрацювання долота за діаметром;
- створення “сальників”;
- вхід долота в зони з аномальними пластичними тисками;
- відсутність інформації про ККД долота, який залежить від осьового навантаження на долото, властивостей бурового розчину (густина, в'язкості, водовіддачі, показників фільтрації, концентрації твердої фази і т.п.), спрацювання опор, оснащення долота, а також від зміни умов буріння на вибої свердловини.

Тепер розглянемо друге і третє рівняння системи (27). Для цього розглянемо розмірності коефіцієнтів K_2 і K_3 .

$$[K_2] = \frac{M}{Дж};$$

$$[K_3] = \frac{M}{Дж}.$$

Отже, коефіцієнт K_2 характеризує величину лінійного спрацювання оснащення бурового долота, яка припадає на одиницю витраченої на руйнування гірської породи енергії:

$$K_2 = \frac{d\varepsilon/dt}{F^{\alpha_2} n^{\beta_2}}; \frac{M}{Дж}; \frac{M}{КВт \cdot год}. \quad (34)$$

Оскільки в (34) всі параметри контролювані, то показник K_2 може бути використаний як критерій оптимальності процесу буріння

$$K_2(x) \xrightarrow{x \in S} \min, \quad (35)$$

де

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

F_i, n_i – осьове навантаження на долото і швидкість його обертання в i -му рейсі долота.

Аналогічно, коефіцієнт K_3 характеризує величину лінійного спрацювання опор бурового долота, яка припадає на одиницю витраченої на руйнування породи енергії:

$$K_3 = \frac{dg/dt}{F^{\alpha_3} n^{\beta_3}}; \frac{M}{Дж}; \frac{M}{КВт \cdot год}. \quad (35)$$

Проте, параметр g в формулі (35) є неконтрольованим в реальному часі. Він може бути визначений лише на стадії катастрофічного спрацювання опор долота [1].

Висновок

На основі результатів дослідження властивостей технологічного процесу поглиблення свердловини в термінах “вхід-вихід” удосконалено кібернетичну модель процесу поглиблення, яка кількісно і якісно відтворює взаємозв'язки між керованою і керуючою підсистемами і містить у своїй структурі:

- математичний опис динаміки об'єкта в просторі станів h, ε, g ;
- граничні умови;
- технологічні обмеження на процес керування;
- критерій оптимальності – мінімум питомих витрат енергії.

Література

- 1 Семенцов Г.Н. Оптимальное управление процессом бурения нефтяных и газовых скважин: Дис... докт. техн. наук 05.13.07./ Москва, МИНХиГП – 1990. – 277 с.
- 2 Исакович Р.Я., Логинов В.И., Попадько В.И. Автоматизация производственных процессов нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра; 1983. – 424 с.
- 3 Семенцов Г.Н., Петров И.П., Кукурудз С.Ф. Промышленные исследования механической скорости бурения как функции времени // Нефтяное хозяйство. – 1970. – №8. – С.12-15.
- 4 Семенцов Г.Н. Автоматизация процессу буріння свердловин. – Івано-Франківськ: Факел, 1999. – 300 с.
- 5 Булатов А.И., Аветисов А.Г. Справочник инженера по бурению. Т. II. – М.: Недра, 1985. – 191 с.

6 Козловский Е.А., Гафиятуллин Р.Х. Автоматизация процесса геолого-разведочного бурения. – М.: Недра, 1977. – 215 с.

7 Горбійчук М.І. Семенов Г.Н. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 493 с.

8 Вакула А. Поваляев А. Редукторные турбобуры возвращаются на месторождениях Татарии // Бурение и нефть. – 2004. – №6. – С.16-24.

9 Кунцяк Я.В., Гаврилов Я.С., Дубленич Ю.В., Мартинюк Д.М., Мрозек Р.С., Зубарев В.І., Курінов А. І. Технічні засоби буріння нафтових і газових свердловин // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – №3 – С.20-22.

УДК 62-503.57:622.691

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПРИВОДІВ

Є.О.Ковалів

УМГ „Прикарпаттрансгаз”, м. Івано-Франківськ, вул. Незалежності, 48
тел. (03422) 22386

Рассмотрены вопросы разработки методов и алгоритмов оптимального управления работой многоцеховых компрессорных станций с разными типами приводов. Описаны эмпирические модели нагнетателей природного газа на основе данных, полученных в процессе их нормальной работы. Решены вопросы учета энергетических затрат на сжатие газа и ограничения на технологические режимы в процессе работы нескольких параллельно работающих групп компрессорных агрегатов. Оценены результаты промышленного внедрения указанных режимов работы компрессорных агрегатов.

The questions of development of methods and algorithms of optimum management work of the stations of compressors of multiworkshops are considered with the different types of drives. The empiric models of superchargers of natural gas are described on the basis of information, got in the process of their normal work. The questions of account of power expenses are decided on the compression of gas and limitation on the technological modes in the process of work of a few parallel workings groups of aggregates of compressors. The results of industrial introduction of the indicated modes of operations of aggregates of compressors are appraised.

Україна має потужну та розвинуту мережу транспортування газу від східних кордонів до країн Центральної та Західної Європи. За останні роки через українську газотранспортну систему транспортовано 200 млрд. куб. м природного газу, в тому числі близько 120 млрд. куб. м. – це транзит російського газу до європейських країн і Туреччини, що складає понад 90% від загального обсягу експорту російського газу до цих країн.

Однією із вузлових і найпотужніших КС УМГ “Прикарпаттрансгаз” є Богородчанська КС, загальна проектна продуктивність якої майже $8,5 \times 10^6$ $\text{м}^3/\text{год}$. Витрати газу на власні потреби тільки по цій КС становлять близько 32×10^3 $\text{м}^3/\text{год}$, а витрати електричної енергії – близько $1,2 \times 10^6$ $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{добу}$. За цих умов важливого значення набувають питання раціонального використання енергоресурсів, які витрачаються на перекачування газу магістральними газопроводами. Один із шляхів вирішення цієї проблеми є оптимальне керування роботою компресорних станцій з різними типами приводів газоперекачуючих агрегатів (ГПА).

Автором проаналізовано основні критерії оцінки ефективності роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) і показано, що для оцінки роботи КС загалом слід використовувати вартісні показники енерговитрат на компримування газу.

Робота нагнітачів достатньо точно описується емпіричними або аналітичними моделями статистики і служить основою існуючих інженерних методик розрахунку режимів роботи КС з різними схемами включення. Відомі інженерні методики розрахунку режимів роботи КС не враховують дрейф статичних характеристик ГПА в процесі експлуатації, а тому можуть використовуватись лише на стадії проектування. Емпіричні моделі статистики ГПА, запропоновані різними авторами, не враховують параметри навколишнього середовища (температура повітря та атмосферний тиск), що знижує їх точність і робить малоприматними для цілей оптимального керування.

Застосування сучасних методів ідентифікації КС на базі даних, отриманих в процесі їх експлуатації, дає можливість створити адекватні моделі процесу компримування газу і на цій основі синтезувати ефективні алгоритми оптимізації роботи багатоцехових КС з різними типами приводів ГПА.

Компресорне обладнання магістральних газопроводів УМГ “Прикарпаттрансгаз” характеризується значною різноманітністю. Тут встановлено обладнання як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва. Як приклад розглянуто Богородчанську КС, на якій встановлені приводи нагнітачів двох типів – газотурбінні установки (ГТУ) і електроприводи (ЕП). Пока-