

ВИЗНАЧЕННЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ СИЛ ОПОРУ НА ВЕЛИЧИНУ ОСЬОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОЛОТО В ПОХИЛО-СПРЯМОВАНІЙ СВЕРДЛОВИНІ

¹Я.В.Кунцяк, ¹Р.Я.Кунцяк, ²О.М.Лев

¹ЗАТ «НДІКБ бурового інструменту», м. Київ, пр. Палладіна, 44, тел. (044) 4442089,
e-mail: ndikbbi@bk.ru

²ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 994147
e-mail: drill@nung.edu.ua

Предложена математическая модель конструкции буровой колонны для определения эффективной силы, которая передается долотом на забой скважины. Базируясь на этой модели, разработана компьютерная программа, на основе которой дается оценка влияния сил сопротивления на величину осевой нагрузки на долото в наклонно-направленной скважине и определяется оптимальная интенсивность искривления скважины для разных компоновок буровых труб.

The mathematical model of boring column construction for the determination of effective force, which has effect on the border of the boring well, passing the chisel, is offered. Based on this model, the computer program is elaborated, which gives the estimation of the resistance forces influence on the value of the axial loading on the chisel in the inclined-directed boring well and the optimal intensity of the curvature of boring well for different parts of drilling tubes is determining.

Постановка проблеми. Одним з найперспективніших шляхів підвищення коефіцієнта нафтогазовилучення з пласта і зниження собівартості нафти і газу на сьогоднішній день є розробка родовищ горизонтальними та горизонтально-розгалуженими свердловинами. Тому за останні два десятиріччя у зарубіжній і вітчизняній практиці спостерігається інтенсивне нарощування обсягів буріння таких свердловин. Створені нові технології і технічні засоби, які дають змогу успішно проводити горизонтальні стволи протяжністю 8-10 тис. метрів.

Під час проектування осьового навантаження на долото необхідно враховувати сили тертя бурової колонни в інтервалах похилих і горизонтальних ділянок свердловини, так як осьове навантаження, яке створюється компоновкою бурової колонни, повністю не передається породоруйнівному інструменту, що є однією з причин зниження темпів поглиблення свердловин.

Аналіз досліджень публікацій по даній проблемі. Розрахунками бурових і обсадних колон займалися Г.М.Саркісов, Б.З. Султанов, А.Е.Сароян та інші вчені. Але саме вплив сил тертя на величину осьового навантаження на долото в похило-спрямованій свердловині до кінця не досліджено і тому ця проблема залишається дуже актуальною.

Цілі статті (постановка задачі). Розглянемо схему компоновки бурової колонни (рис. 1), яка складається з долота 1, лопатевого спірального калібратора 2, гвинтового двигуна 3, телеметричної системи 4, бурових труб 5 і замкового з'єднання 6. Інтенсивність викривлення свердловини задається в межах від одного до трьох градусів на 10 метрів. Верхня час-

тина колони стискається обважненими буровими трубами, які створюють осьову силу (F_{oc}). Задача зводиться до визначення ефективною сили (F_{ef}), яка передається долотом на вибій свердловини за відомою осьовою силою, створюваною компоновкою бурової колонни. Цю задачу можна розділити на дві частини: спочатку знайти F_{ef} на похило-спрямованій свердловині, яка виходить на горизонтальну ділянку, а далі визначити F_{ef} під час поступового збільшення кількості горизонтальних ділянок свердловини. В даній статті розглядається тільки перша частина задачі. Крім того, важливо визначити за якої інтенсивності викривлення свердловини відбувається усталений процес буріння, під час якого колона знаходиться в стійкому положенні рівноваги.

Основна частина. Для спрощення розв'язку задачі задаємося величиною F_{ef} і в напрямку від долота визначаємо значення сил тертя в елементах колонни, після чого знаходимо величину F_{oc} . Для розв'язання задачі приймається розрахункова схема, зображена на рисунку 2. Буровий стержень розбивається на ділянки, які являють собою прямолінійні стержні шарнірно обперті на стінку свердловини в точках, де знаходяться замкові з'єднання. До першої горизонтальної ділянки OO_2 відноситься калібратор OO_1 і гвинтовий двигун O_1O_2 . До другої ділянки O_2O_3 , яка утворює кут β з ділянкою O_1O_2 , відноситься телеметрична система. Третя та всі наступні ділянки являють собою бурові труби і кожна наступна ділянка утворює з попередньою кут α . Введемо такі позначення: q_0, q_1, q_2, q – відповідно поперечна

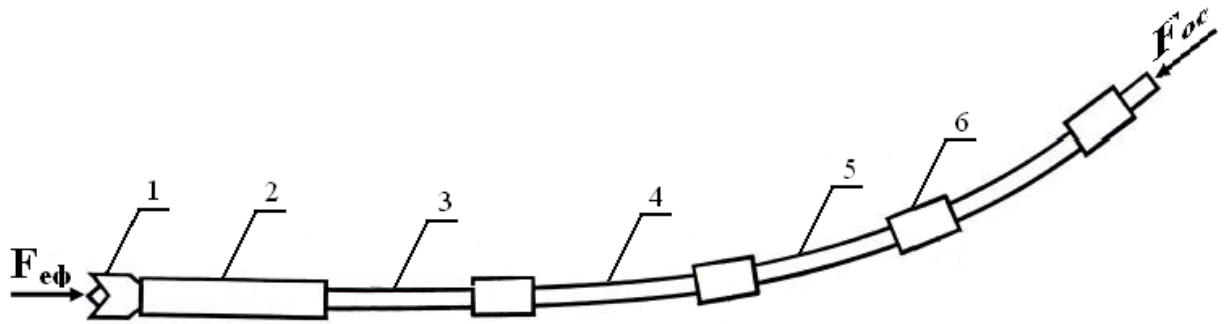


Рисунок 1 — Схема компоновки бурильної колони

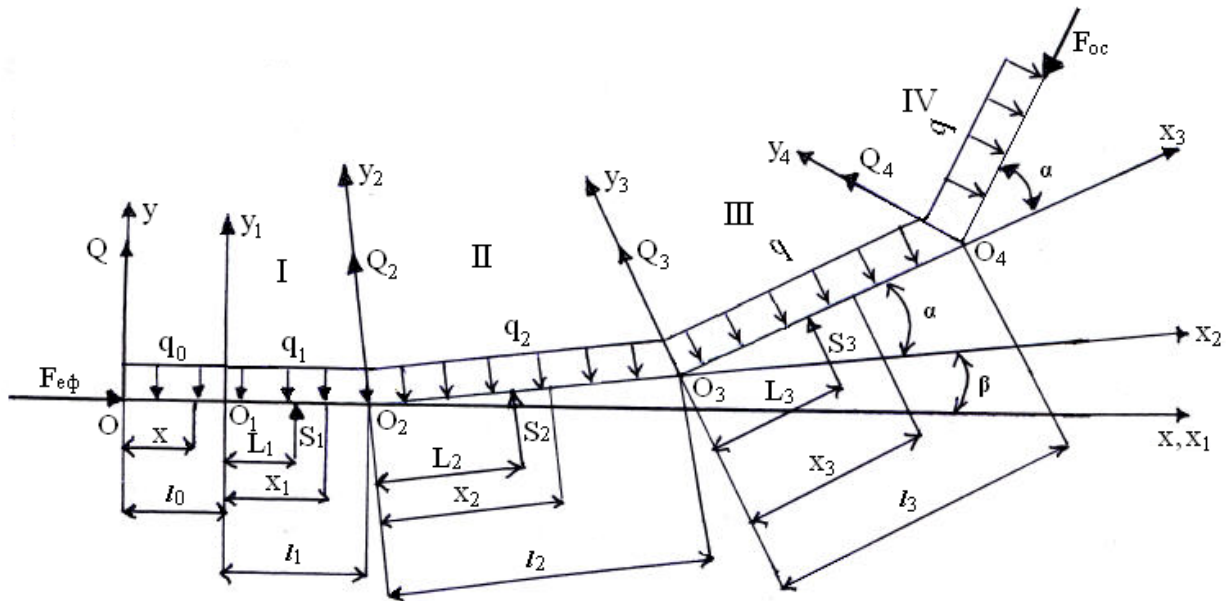


Рисунок 2 — Розрахункова схема дії сил при згині колони в свердловині

складова від ваги одиниці довжини калібратора, гвинтового двигуна, телеметричної системи і бурильних труб; Q_1, Q_2, Q_3 — поперечні реакції на долоті і в замкових з'єднаннях; S_1, S_2, S_3 — реакції стінки свердловини в точках її контакту відповідно з 1, 2, 3 ділянками колони; l_0, l_1, l_2, l_3 — довжини калібратора, гвинтового двигуна, телеметричної системи, бурильних труб.

Вважається, що калібратор абсолютно жорсткий, а жорсткість (EI) гвинтового двигуна, телеметричної системи і бурильних труб приблизно однакова.

Розглянемо ділянку OO_1 . Пружна лінія калібратора OO_1 — є пряма $y = -kx$. Диференціальне рівняння пружної лінії двигуна від точки O_1 до точки контакту з свердловиною має вигляд [1]:

$$EJ \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = -F_{e\phi} y_1 + Q(x_1 + l_0) - q_0 l_0 \left(\frac{l_0}{2} + x_1 \right) - \frac{1}{2} q_1 x_1^2. \quad (1)$$

Інтегруючи (1), маємо:

$$y_1(x_1) = a \sin k_1 x_1 + b \cos k_1 x_1 + c(x_1 + l_0) - \frac{1}{F_{e\phi}} \left(\frac{q_1 x_1^2}{2} + q_0 l_0 x_1 + \frac{q_0 l_0^2}{2} - \frac{q_1}{k_1^2} \right), \quad (2)$$

де: a, b — довільні сталі;

$$k_1 = \sqrt{\frac{F_{e\phi}}{EJ}}; \quad c = \frac{Q}{F_{e\phi}}.$$

Граничні умови:

$$\text{коли } x_1 = 0, \text{ то } y_1 = -kl_0, \quad y_1' = -k;$$

$$\text{коли } x_1 = L_1, \text{ то } y_1 = -r_1, \quad y_1' = 0,$$

де r_1 — радіальний проміжок між двигуном і стінкою свердловини.

Звідси отримуємо систему рівнянь для визначення довільних сталих, реакції долота і довжини L_1 :

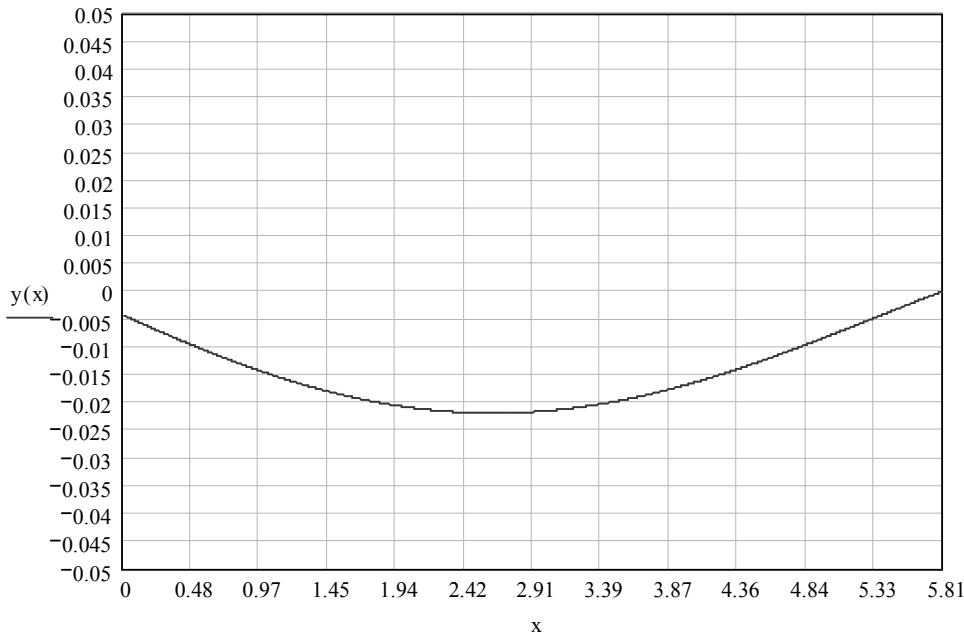


Рисунок 3 — Епюра прогинів гвинтового двигуна

$$\begin{aligned}
 b + cl_0 - \frac{q_0 l_0^2}{2F_{ef}} + \frac{q_1}{k_1^2 F_{ef}} &= -kl_0; \\
 ak_1 + c - \frac{q_0 l_0}{F_{ef}} &= -k; \\
 a \sin k_1 L_1 + b \cos k_1 L_1 + c(L_1 + l_0) &= \\
 = \frac{1}{F_{ef}} \left(\frac{q_1 L_1^2}{2} + q_0 l_0 L_1 + \frac{q_0 l_0^2}{2} - \frac{q_1}{k_1^2} \right) - r_1; &(3) \\
 ak_1 \cos k_1 L_1 - bk_1 \sin k_1 L_1 + c &= \\
 = \frac{1}{F_{ef}} (q_1 L_1 + q_0 l_0). &
 \end{aligned}$$

Виключаючи з (3) k і задаючи різні значення L_1 , можна (наприклад, за методом Гаусса) знайти невідомі a, b, c . Задача полягає у визначенні відстані L_1 , за якої колона мала б більш стійке положення рівноваги, тобто коли вона згинається і зовсім не тисне на стінку свердловин, тільки її торкається. В цьому випадку реакція S_1 з боку свердловини дорівнює нулю. Задача може бути розв'язана з допомогою ЕОМ. Для цього будеться епюра прогинів за рівнянням (2) і змінюючи L_1 вибирається такий графік функції $y_1(x)$, для якого $y_1(l_1) = 0$ (рис. 3).

Диференціальне рівняння осі колони від точки контакту з свердловиною до точки O_2 має вигляд:

$$\begin{aligned}
 EJ \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} &= -F_{ef} y_1 + Q(x_1 + l_0) - \\
 - q_0 l_0 \left(\frac{l_0}{2} + x_1 \right) - \frac{1}{2} q_1 x_1^2 + S_1 (x_1 - L_1). &(4)
 \end{aligned}$$

Інтегруючи (4), маємо

$$\begin{aligned}
 y_1(x) &= a_1 \sin k_1 x_1 + b_1 \cos k_1 x_1 + \\
 &+ c_1 (x_1 - L_1) + \frac{1}{F_{ef}} \times \\
 &\times \left[-\frac{q_1 x_1^2}{2} + (Q - q_0 l_0) x_1 + Q l_0 - \frac{q_0 l_0^2}{2} + \frac{q_1}{k_1^2} \right], &(5)
 \end{aligned}$$

де a_1, b_1 – нові довільні сталі; $c_1 = S_1 / F_{ef}$.

З граничних умов: коли $x_1 = L_1$, то $y_1 = -r_1, y_1' = 0$; коли $x_1 = l_1$, то $y_1 = 0$, отримуємо систему трьох алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих a_1, b_1, c_1 .

$$\begin{aligned}
 a_1 \sin k_1 L_1 + b_1 \cos k_1 L_1 &= \frac{1}{F_{ef}} \times \\
 \times \left[\frac{q_1 L_1^2}{2} - (Q - q_0 l_0) L_1 + Q l_0 + \frac{q_0 l_0^2}{2} - \frac{q_1}{k_1^2} \right] - r_1; & \\
 a_1 k_1 \cos k_1 L_1 - b_1 k_1 \sin k_1 L_1 + c_1 &= \\
 = \frac{1}{F_{ef}} (q_1 L_1 - Q + q_0 l_0); &(6) \\
 a_1 \sin k_1 l_1 + b_1 \cos k_1 l_1 + c_1 (l_1 - L_1) &= \\
 = \frac{1}{F_{ef}} \left(\frac{q_1 l_1^2}{2} - Q l_1 + q_0 l_0 l_1 - Q l_0 + \frac{q_0 l_0^2}{2} - \frac{q_1}{k_1^2} \right). &
 \end{aligned}$$

Визначивши із системи (6) значення a_1, b_1, c_1 та побудувавши епюру прогинів за формулою (5), бачимо, що на ділянці 1 колона дотикається свердловиною тільки в одній точці, значить попередній розрахунок правильний.

Зусилля Q і S_1 визначені з умови, що буринна колона знаходиться в спокої. В процесі буріння відбувається рівномірний рух колони і внаслідок цього виникають сили тертя зі стінкою свердловини. Ці сили суттєво впливають на величину F_{ef} . Приймаючи, що коефіцієнт тертя $f = 0,12$, знаходимо суму проєкцій всіх сил першої ділянки на осі x_1 і y_1 . Позначимо їх відповідно T_1 і R_1 .

$$\begin{aligned} T_1 &= F_{ef} + (Q + S_1)f, \\ R_1 &= Q - q_0 l_0 + S_1 - q_1 l_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Розглянемо ділянку II від точки O_2 до точки дотику колони з свердловиною. Диференціальне рівняння пружної лінії без урахування скорочення від стиску має вигляд

$$EJ \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = -P_2 y_2 + Mo_2 + P_2' x_2 - \frac{q_2 x_2^2}{2}, \quad (8)$$

де P_2, P_2', Mo_2 – відповідно осьова сила, поперечна сила і згинаючий момент на початку другої ділянки:

$$\begin{aligned} P_2 &= T_1 \cos \beta + R_1 \sin \beta; \\ P_2' &= Q_2 + R_1 \cos \beta - T_1 \sin \beta; \\ Mo_2 &= Q(l_0 + l_1) - q_0 l_0 (0,5l_0 + l_1) + \\ &+ S_1(l_1 - L_1) - 0,5q_1 l_1^2. \end{aligned}$$

Інтегруючи (8), маємо:

$$\begin{aligned} y_2(x_2) &= a_2 \sin k_2 x_2 + b_2 \cos k_2 x_2 + c_2 x_2 + \\ &+ \frac{1}{P_2} \left(-\frac{q_2 x_2^2}{2} + \frac{q_2}{k_2^2} + Mo_2 \right), \end{aligned} \quad (9)$$

де a_2, b_2, c_2 – вже нові довільні сталі;

$$k_2 = \sqrt{\frac{P_2}{EJ}}; \quad c_2 = \frac{P_2'}{P_2}.$$

Граничні умови:

$$\begin{aligned} \text{коли } x_2 = 0, \text{ то } y_2 = 0, y_2' = \theta = y_1'(l_1) - \beta; \\ \text{коли } x_2 = L_2, \text{ то } y_2 = -r_1, y_2' = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Підставляючи (9) в (10), отримаємо систему чотирьох алгебраїчних рівнянь для визначення невідомих a_2, b_2, c_2 і довжини L_2 .

$$\begin{aligned} b_2 + \frac{q_2}{P_2 k_2^2} + \frac{Mo_2}{P_2} = 0; \quad a_2 k_2 + c_2 = \theta; \\ a_2 k_2 \cos k_2 L_2 - b_2 k_2 \sin k_2 L_2 + c_2 = \frac{q_2 L_2}{P_2}; \quad (11) \\ a_2 \sin k_2 L_2 + b_2 \cos k_2 L_2 + c_2 L_2 + \\ + \frac{1}{P_2} \left(-\frac{q_2 L_2^2}{2} + \frac{q_2}{k_2^2} + Mo_2 \right) = -r_1. \end{aligned}$$

Отримана система (11) є нелінійною. Аналогічні системи розв'язувались, наприклад в [2], де для їх розв'язку складалась окрема досить складна і громіздка програма. Цього можна уникнути, якщо попередньо задатись вели-

чиною L_2 , яку підставити в систему перших трьох рівнянь (11) і розв'язати її. Одержані значення a_2, b_2, c_2 підставити в четверте рівняння (11) і розглядати його як перевірочне. Після декількох спроб система (11) розв'язується у комп'ютерному варіанті з будь-якою точністю.

Після цього розглядається ділянка II від точки дотику колони з свердловиною до точки O_3 . Диференціальне рівняння пружної лінії колони матиме вигляд

$$\begin{aligned} EJ \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} &= -P_2 y_2 + Mo_2 + P_2' x_2 - \\ &- \frac{q_2 x_2^2}{2} + S_2 (x_2 - L_2). \end{aligned} \quad (12)$$

Інтегруючи (12), маємо

$$\begin{aligned} y_2(x_2) &= a_3 \sin k_2 x_2 + b_3 \cos k_2 x_2 + \frac{1}{P_2} \times \\ &\times \left[S_2 (x_2 - L_2) - \frac{q_2 x_2^2}{2} + \frac{q_2}{k_2^2} + P_2' x_2 + Mo_2 \right], \end{aligned} \quad (13)$$

де a_3, b_3 – довільні сталі.

Граничні умови:

$$\begin{aligned} \text{коли } x_2 = L_2, \text{ то } y_2(L_2) = -r_1, y_2'(L_2) = 0; \\ \text{коли } x_2 = l_2, \text{ то } y_2 = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Підставляючи (13) в (14), одержимо лінійну систему трьох алгебраїчних рівнянь, з якої визначаємо невідомі a_3, b_3 та S_2 . Побудувавши епюру пружної лінії колони на ділянці II, бачимо, що колона має з свердловиною тільки одну точку контакту, а значить попередній розрахунок є вірний. Позначивши суму проєкцій всіх сил другої ділянки на осі x_2, y_2 відповідно T_2 і R_2 отримаємо

$$\begin{aligned} T_2 &= (Q_2 + S_2)f - q_2' l_2; \\ R_2 &= Q_2 + S_2 - q_2 l_2, \end{aligned}$$

де q_2' – поздовжня складова від ваги одиниці довжини телеметричної системи.

Для третьої ділянки від її початку точки O_3 до точки дотику колони з свердловиною диференціальне рівняння пружної лінії має вигляд

$$EJ \frac{d^2 y_3}{dx_3^2} = -P_3 y_3 + Mo_3 + P_3' x_3 - \frac{q_3 x_3^2}{2}, \quad (15)$$

де P_3, P_3', Mo_3 – відповідно осьова сила, поперечна сила і згинаючий момент на початку третьої ділянки:

$$\begin{aligned} P_3 &= T_1 \cos(\beta + \alpha) + T_2 \cos \alpha + \\ &+ R_1 \sin(\beta + \alpha) + R_2 \sin \alpha; \\ P_3' &= Q_3 + R_1 \cos(\beta + \alpha) + R_2 \cos \alpha - \\ &- T_1 \sin(\beta + \alpha) - T_2 \sin \alpha; \end{aligned} \quad (16)$$

$$Mo_3 = Mo_2 + P_2' l_2 + S_2 (l_2 - L_2) - \frac{q_2 l_2^2}{2}.$$

Таблиця 1 – Значення осьової сили на початку кожної ділянки залежно від компоновки колони

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Зенітний кут викривлення свердловини, град	90	89,13	86,7	84,27	81,84	79,41	76,98	74,55	72,12	69,69	67,26	64,83	62,4	59,97	57,54	55,11	52,68	50,25	47,82	45,39
P_i , кН	78,48	78,88	80,57	81,11	81,53	81,84	82,02	82,07	82,01	81,82	81,5	81,07	80,51	79,83	79,04	78,12	77,09	75,95	74,7	73,33

Інтегруючи (15) і записуючи граничні умови, знаходимо довільні сталі і реакцію Q_3 . Далі аналогічно визначимо S_3 і суму проєкцій всіх сил третьої ділянки на осі x_3 і y_3 . Починаючи з IV ділянки задача стає досить громіздкою і для її розв'язання розроблено комп'ютерну програму, за допомогою якої визначаються всі сили і реакції на IV, V і наступних ділянках.

Розглянемо приклад розрахунку величини осьового навантаження на долото за таких даних:

- діаметр долота $D_\delta = 215,9$ мм;
- діаметр калібратора $D_k = 212$ мм;
- довжина калібратора $l_0 = 0,372$ м;
- маса калібратора $m_0 = 68$ кг;
- діаметр гвинтового двигуна $D_{ВД} = 172$ мм;
- довжина гвинтового двигуна $l_1 = 5,812$ м;
- маса гвинтового двигуна $m_1 = 830$ кг;
- діаметр телеметричної системи $D_{ТС} = 172$ мм;
- довжина телеметричної системи $l_2 = 9,00$ м;
- маса телеметричної системи $m_2 = 700$ кг;
- зовнішній діаметр бурильних труб $d_{БТ} = 127$ мм;
- внутрішній діаметр бурильних труб $d_в = 108,62$ мм;
- інтенсивність викривлення $i = 2,43$ °/10м;
- відстань між замками $l_3 = 9,00$ м.

Так, приймаючи $F_{эф} = 78,48$ кН (8т), отримали $L_1 = 2,62$ м, $a = -0,219$, $b = -0,306$, $c = 0,0518$.

Розв'язавши систему рівнянь (6), маємо $a_1 = -0,219$, $b_1 = -0,306$, $c_1 = 6,253 \cdot 10^{-6}$.

Звідси $Q = 4,081$ кН, $S_1 = 0,49$ Н. Слід зазначити, що реакція свердловини дуже мала ($S_1 = 0,49$ Н), але не дорівнює нулю. Для заданої розрахункової схеми нас ця точність влаштовує. За потреби завжди досить легко можна підібрати за комп'ютером довжину L_1 таку, щоб $S_1 \rightarrow 0$ з будь-якою точністю.

Визначивши Q і S_1 , знаходимо за формулами (7) T_1, R_1 , потім P_2, P'_2, Mo_2 , далі розглядається ділянка II і все повторюється. Зазначимо, що задачу можна розв'язувати для вказаної вище інтенсивності викривлення свердловини. Але, очевидно, що найменша сила тертя колони об свердловину буде у випадку, коли колона на кожній ділянці спирається на свердловину тільки в одній точці. Саме усталений процес буріння, за якого колона знаходиться в стійкому положенні рівноваги відбувається при $i = 2,7$ °/10м. Цьому значенню відповідає $\alpha = 2,43$ °. Значення кута β беремо рівним $\beta = 0,87$ °.

Розрахунки проводились від першої до двадцятої ділянки, що утворює кут $45,39$ ° з вертикаллю.

В таблиці 1 представлено результати розрахунку з визначення величини осьової сили на початку кожної ділянки. З таблиці видно, що з 1 до 8 ділянки P_i зростає, а далі спадає. Це пов'язано з тим, що з 1 до 8 ділянки рівнодіюча сил тертя на кожній ділянці перевищує рівнодіючу осьових сил на цій ділянці, а з 8 по 20 ділянку навпаки – сили тертя зменшуються, а осьові сили збільшуються.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшої роботи в даному напрямку. Запропоновано математичну модель конструкції бурильної колони, на основі якої визначається $F_{эф}$, яка передається долотом на вибій свердловині при заданій осьовій силі. На основі створеної комп'ютерної програми, можна знайти $F_{эф}$ і визначити оптимальну інтенсивність викривлення свердловини. Отримані результати дають можливість продовжити дослідження з визначення $F_{эф}$, поступово збільшуючи кількість горизонтальних ділянок свердловини.

Література

- 1 Писаренко Г.С. Опір матеріалів. – К.: Вища школа, 1985. – 672 с.
- 2 Султанов Б.З., Ишемгузин И.Х., Сорочкин В.Н. Работа бурильной колонны в скважине. – М.: Недра, 1973. – 216 с.