

ки, точки заглибленого зовнішнього торця “вертанням” потрібно використати поверхневий інтеграл другого роду по поверхні канавки, яка описується рівнянням (3) у кінцевому вигляді $x_{A_0} = x(t)$; $y_{A_0} = y(t)$; $z_{A_0} = v_{mc}t$.

Висновки

Отримані в статті узагальнені закономірності формування канавок на вибої відрізняються від розробок попередників врахуванням руху усіх характерних елементів бурильної колони. Вони можуть бути корисними під час проектування режимів буріння та відкривають перспективи обґрунтованого вибору параметрів бурильного інструменту:

- 1) форми вінців і поперечного перерізу дисків;
- 2) кута заточування кромки;
- 3) величини ексцентриситету та нахилу осей обертання шарошок;
- 4) комбінації різних варіантів багатошарошкових доліт (аксіальних і дезаксіальних);
- 5) кроку між вінцями.

Література

- 1 Симонов В.В., Вискребцов В.Т. Работа шарошечных долот и их совершенствование. – М.: Недра, 1978. – 240 с.
- 2 Павловський М.А. Теоретична механіка. – К.: Техніка, 2002. – 511 с.
- 3 Палий Б.А., Корнеев К.Е. Буровые долота – М.: Недра, 1971. – 446 с.

УДК 622.243.272

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛОЖЕННЯ БЕЗОПОРНИХ КОМПОНОВОК НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ (КНБК) В ПОХИЛО-СКЕРОВАНОМУ СТОВБУРІ СВЕРДЛОВИНИ

А.Р.Юрич

ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42480,
e-mail: nding@nunge.edu.ua

Описан подход к расчету и моделированию положения неориентированных безопорных КНБК в наклонно-направленном стволе скважины для обеспечения ее проектного профиля. Подход реализуется на ЭВМ и обеспечивает высокую точность результатов.

In the paper the approach of position calculation and simulating of non-oriented unsupported drill string assembly's in directional drilled hole for providing its design profile is described. The approach is realized on PC and provides precise results.

Одним із основних завдань, яке ставиться під час спрямованого буріння є дотримання параметрів проектного профілю. Тому постає завдання розробки науково-обґрунтованих технологічних рекомендацій та технічних засобів, які б дали змогу проводити оптимальне керування системою „долото – КНБК – бурильні труби”. Актуальність проблеми керування рухом долота в процесі поглиблення свердловини обумовлена тим, що у випадку відхилення профілю від проектного, часто виникають ускладнення та аварії, ліквідація яких призводить до непрогнозованих затрат часу та матеріальних ресурсів. Основними причинами відхилення від проектного профілю свердловини є неправильно вибрані конструктивні параметри нижньої частини бурильної колони для конкретних умов буріння. Тому дослідження пружно-деформованого стану КНБК і вдосконалення методології проектування є першочерговим завданням, яке потребує вирішення.

чись в основному на обширні аналітичні спрощення та припущення, пов'язані з складністю отримання розв'язку диференціальних рівнянь, без потужних пакетів математичних програм. На даний час наявність таких програм дає можливість розв'язати дану задачу з високою точністю. У поєднанні з промисловими відомостями про реальні умови роботи КНБК це дасть змогу ефективніше оцінити напружено-деформований стан (НДС) КНБК і забезпечити провдку свердловини згідно проектного профілю.

Як показала практика ведення бурових робіт, найчастіше використовуються безопорні та одноопорні КНБК [6-7]. Причому безопорні КНБК є найчастіше однорозмірними або дворозмірними.

Основні методи проектування напружено-деформованого стану КНБК і їх вибору наводяться в дослідженнях [1-5]. Вони побудовані на основних принципах взаємодії елементів компоновок із стовбуром свердловини, опираю-

В зв'язку з цим, розроблено підхід до розрахунку неорієнтованих КНБК у похило-спрямованому стовбурі свердловини. Базовою залежністю при цьому може бути диференціальне рівняння IV порядку, отримане в результаті подвійного диференціювання рівняння пружної осі КНБК [4], і описує НДС однорозмірної КНБК (рис. 1) у свердловині.

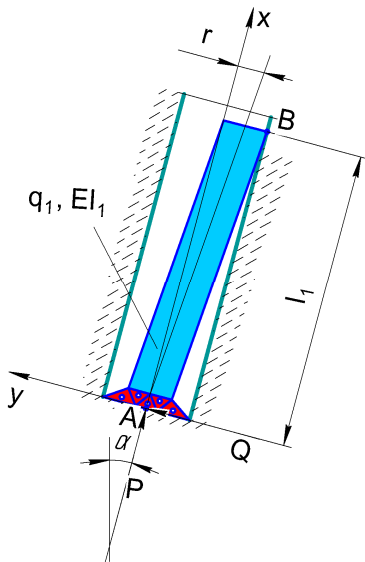


Рисунок 1 – Розрахункова схема взаємодії однорозмірної КНБК з стінками свердловини

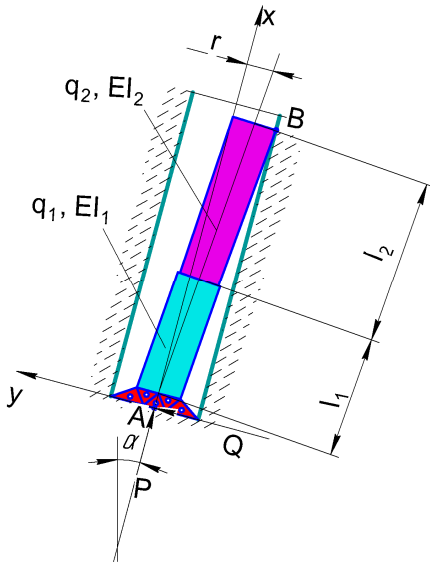


Рисунок 2 – Розрахункова схема взаємодії дворозмірної КНБК з стінками свердловини

$$EI_1 \cdot \frac{d^4 y_1}{dx^4} + P \cdot \frac{d^2 y_1}{dx^2} = -q_1 \cdot \sin(\alpha), \quad (1)$$

де: q_1 – вага погонного метра елемента КНБК;
 EI_1 – жорсткість елемента КНБК на згин;
 P – осьове навантаження на долото;
 α – zenітний кут нахилу осі свердловини;
 $y_1(x)$ – функція прогинів пружної осі КНБК.

Розв'язки рівняння (1) повинні задовольняти такі граничні умови:

$$\begin{aligned} y_1(0) &= 0; \\ y_1''(0) &= 0; \\ y_1(l_1) &= r; \\ y_1'(l_1) &= 0; \\ y_1''(l_1) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

де r – радіальний проміжок між ОБТ і стінкою свердловини, в точці В.

Припускаємо, що:
 – стінки свердловини не деформуються;
 – згин колони труб відбувається в одній площині;
 – динамічна процеси не враховується.
 Під час розв'язування рівняння (1) з врахуванням граничних умов (2) отримуємо систему з п'яти рівнянь (3).

$$\begin{cases} \frac{-C_1}{K^2} + C_4 = 0; \\ C_1 + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha)}{P} = 0; \\ \frac{-C_2 \cdot EI_1 \cdot \sin(K \cdot l_1)}{P} + \frac{-C_1 \cdot EI_1 \cdot \cos(K \cdot l_1)}{P} + \\ + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot l_1^2}{2 \cdot P} + C_3 \cdot l_1 + C_4 = r; \\ \frac{-C_2 \cdot \sqrt{EI_1} \cdot \cos(K \cdot l_1)}{\sqrt{P}} + \frac{-C_1 \cdot \sqrt{EI_1} \cdot \sin(K \cdot l_1)}{\sqrt{P}} + \\ + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot l_1}{P} + C_3 = 0; \\ C_2 \cdot \sin(K \cdot l_1) + C_1 \cdot \cos(K \cdot l_1) + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha)}{P} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де: $K = \sqrt{\frac{P}{EI_1}}$;

C_1, C_2, C_3, C_4 – сталі інтегрування;
 l_1 – відстань від долота до точки контакту КНБК зі стінкою свердловини.

Для визначення відхиляючої сили на долоті в систему вводимо рівняння статички $\sum M_B = 0$.

$$Q \cdot l_1 + P \cdot r - q_1 \cdot \frac{l_1^2}{2} \cdot \sin(\alpha) = 0. \quad (4)$$

Розв'язавши систему рівнянь, отримуємо функцію прогину осі КНБК (5), відстань від долота до точки контакту КНБК зі стінкою свердловини та відхиляюче зусилля на долоті.

$$y_1(x_1) = -\frac{C_2 \cdot EI_1 \cdot \sin(K \cdot x_1)}{P} - \frac{C_1 \cdot EI_1 \cdot \cos(K \cdot x_1)}{P} - \frac{1}{2} \cdot \frac{q_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot x_1^2}{P} + C_3 \cdot x_1 + C_4. \quad (5)$$

НДС дворозмірної КНБК (рис. 2) описується рівняннями:

$$\begin{cases} EI_1 \cdot \frac{d^4 y_1}{dx^4} + P \cdot \frac{d^2 y_1}{dx^2} = -q_1 \cdot \sin(\alpha); \\ EI_2 \cdot \frac{d^4 y_2}{dx^4} + P \cdot \frac{d^2 y_2}{dx^2} = -q_2 \cdot \sin(\alpha), \end{cases} \quad (6)$$

де: q_1, q_2 – вага погонного метра, для першої та другої ділянки відповідно;
 EI_1, EI_2 – жорсткість елемента КНБК на згин для першої та другої ділянки відповідно;
 P – осьове навантаження на долото;

α – зенітний кут нахилу осі свердловини;
 $y_1(x)$, $y_2(x)$ – функція прогинів пружної осі
 КНБК на першій та другій ділянці відповідно.

Розв'язки (6) повинні задовольняти такі
 граничні умови:

$$\begin{aligned} y_1(0) &= 0; \\ y_1''(0) &= 0; \\ y_1(l_1) &= y_2(0); \\ y_1'(l_1) &= y_2'(0); \\ y_1''(l_1) &= y_2''(0); \\ y_1'''(l_1) &= y_1'''(0); \\ y_2(l_2) &= r; \\ y_2'(l_2) &= 0; \\ y_2''(l_2) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

В результаті розв'язування рівняння (6) з
 врахуванням граничних умов (7) отримуємо
 систему з дев'яти рівнянь (8)

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{-C_1}{K_1} + C_4 = 0; \\ & C_1 + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha)}{P} = 0; \\ & \frac{-C_2 \cdot \sin(K_1 \cdot l_1)}{K_1} + \frac{-C_1 \cdot \cos(K_1 \cdot l_1)}{K_1} + \\ & \quad + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot l_1^2}{2 \cdot P} + C_3 \cdot l_1 + C_4 = \\ & \quad = \frac{-B_1}{K_2^2} + B_4; \\ & \frac{-C_2 \cdot \cos(K_1 \cdot l_1)}{K_1} + \frac{-C_1 \cdot \sin(K_1 \cdot l_1)}{K_1} + \\ & \quad + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot l_1}{P} + C_3 = \frac{-B_2}{K_2}; \\ & \left(C_2 \cdot \sin(K_1 \cdot l_1) + C_1 \cdot \cos(K_1 \cdot l_1) + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha)}{P} \right) \times \\ & \quad \times EI_1 = \left(B_1 + \frac{-q_1 \cdot \sin(\alpha)}{P} \right) EI_2; \\ & (C_2 \cdot K_1 \cdot \cos(K_1 \cdot l_1) - C_1 \cdot K_1 \cdot \sin(K_1 \cdot l_1)) \times \\ & \quad \times EI_1 = B_2 \cdot K_2 \cdot EI_2; \\ & \frac{-B_2 \cdot \sin(K_2 \cdot l_2)}{K_2^2} + \frac{-C_2 \cdot \cos(K_2 \cdot l_2)}{K_2^2} + \\ & \quad + \frac{-q_2 \cdot \sin(\alpha) \cdot l_2^2}{2 \cdot P} + B_3 \cdot l_2 + B_4 = r; \\ & \frac{-B_2 \cdot \cos(K_2 \cdot l_2)}{K_2} + \frac{-B_2 \cdot \sin(K_2 \cdot l_2)}{K_2} + \\ & \quad + \frac{-q_2 \cdot \sin(\alpha) \cdot l_2}{P} + B_3 = 0; \\ & B_2 \cdot \sin(K_2 \cdot l_2) + B_2 \cdot \cos(K_2 \cdot l_2) + \\ & \quad + \frac{-q_2 \cdot \sin(\alpha)}{P} = 0. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

де: $K_1 = \sqrt{\frac{P}{EI_1}}$; $K_2 = \sqrt{\frac{P}{EI_2}}$;

$C_1, C_2, C_3, C_4, B_1, B_2, B_3, B_4$ – сталі інтегру-

вання;
 l_1 – довжина першої ділянки КНБК;
 l_2 – довжина другої ділянки до точки кон-

такту КНБК зі стінкою свердловини.
 Аналогічно як і в попередньому випадку
 для знаходження відхиляючої сили на долоті
 використаємо рівняння статки $\sum M_B = 0$.

$$\begin{aligned} & Q \cdot (l_1 + l_2) + P \cdot r - \\ & - \left(q_1 \cdot l_1 \cdot \left(\frac{l_1^2}{2} + l_2 \right) \cdot \sin(\alpha) + q_2 \cdot \frac{l_2^2}{2} \cdot \sin(\alpha) \right) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

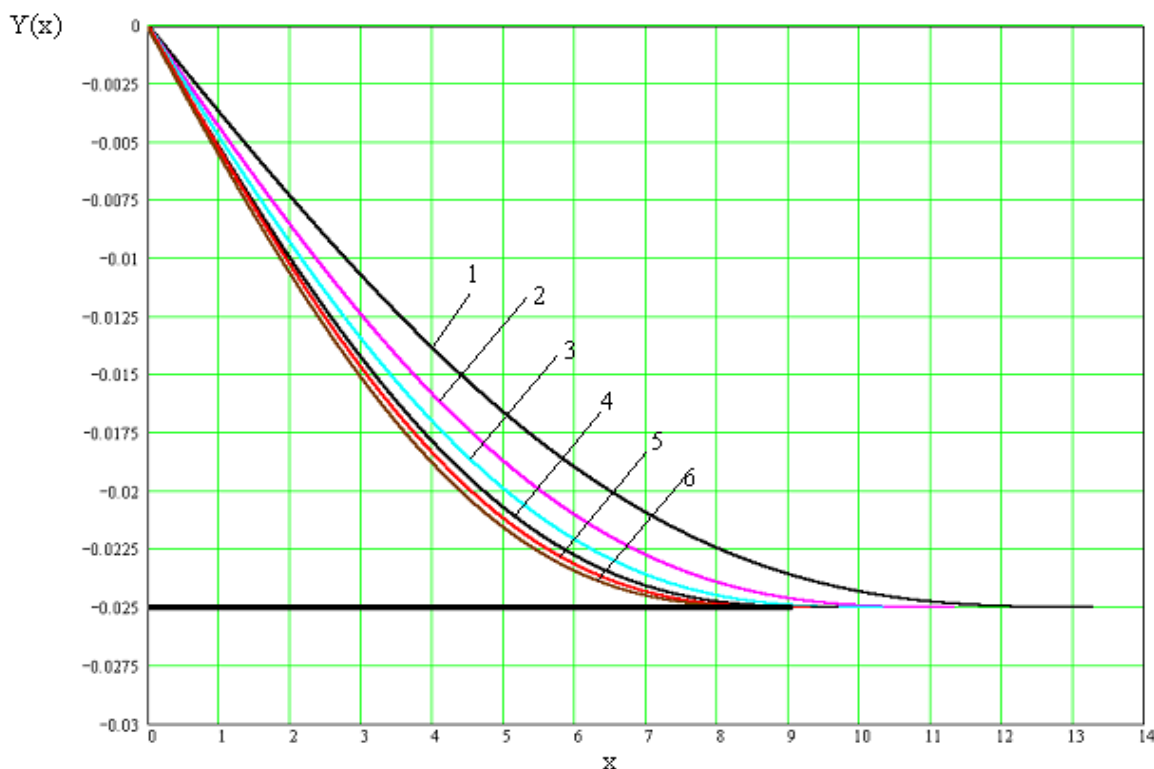
Розв'язавши систему рівнянь, отримуємо
 функції прогину ділянок осі КНБК (10), від-
 стань до точки контакту КНБК зі стінкою свер-
 дловини та відхиляюче зусилля на долоті.

$$\begin{aligned} y_1(x_1) &= -\frac{C_2 \cdot \sin(K_1 \cdot x_1)}{K_1^2} - \frac{C_1 \cdot \cos(K_1 \cdot x_1)}{K_1^2} - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{q_1 \cdot \sin(\alpha) \cdot x_1^2}{P} + C_3 \cdot x_1 + C_4, \\ & (0 \leq x_1 \leq l_1); \\ y_2(x) &= -\frac{B_2 \cdot \sin(K_2 \cdot x_2)}{K_2^2} - \frac{B_1 \cdot \cos(K_2 \cdot x_2)}{K_2^2} - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{q_2 \cdot \sin(\alpha) \cdot x_2^2}{P} + B_3 \cdot x_2 + B_4, \\ & (l_1 \leq x_2 \leq l_1 + l_2). \end{aligned} \quad (10)$$

Для прикладу проведемо розрахунок маят-
 никової компоновки, що складається з ОБТ ва-
 гою погонного метра $q_1=2$ кН і жорсткістю на
 згин $EI_1=20$ МНм² та радіальним проміжком у
 верхній точці її дотику із стовбуром свердло-
 вини $r=0,025$ м. Осьове навантаження стано-
 вить $P=100$ кН за кута нахилу осі свердловини
 $10-60^\circ$.

На основі отриманих результатів було по-
 будовано графічні залежності зміни пружної
 осі КНБК по відношенню до осі свердловини за
 різних зенітних кутів (рис. 3), та залежність від-
 хиляючого зусилля на долоті від зенітного кута
 (рис. 4).

Отримані результати свідчать про прави-
 льність розробленого підходу. Підхід дає змогу
 проводити оцінку напружено-деформованого
 стану безопорних КНБК. Всі аналітичні пере-
 творення та розрахунки можна проводити на
 ЕОМ і з використанням математичного пакету
 Maple або MathCad, що забезпечує високу точ-
 ність. Тому даний метод можна використати
 для вибору КНБК з метою забезпечення проек-
 тного профілю свердловини.



1 – зенітний кут 10° , 2 – зенітний кут 20° , 3 – зенітний кут 30° ,
4 – зенітний кут 40° , 5 – зенітний кут 50° , 6 – зенітний кут 60°

Рисунок 3 – Пружна вісь бурильної колони за різних зенітних кутів осі свердловини

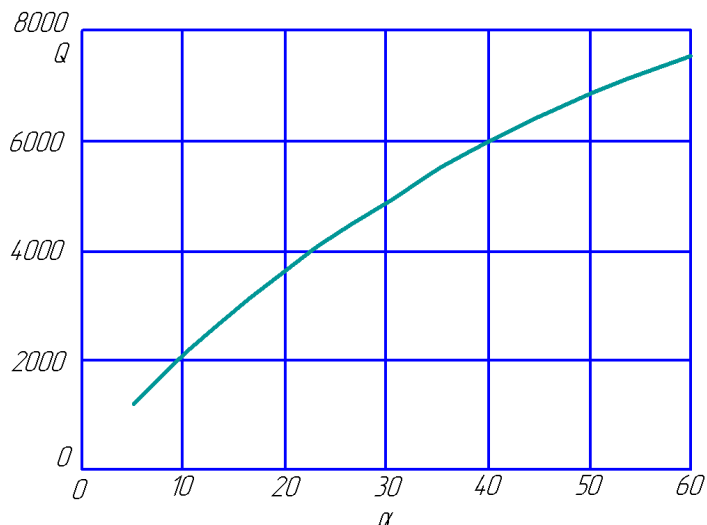


Рисунок 4 – Зміна відхиляючого зусилля на долоті залежно від зенітного кута свердловини

Література

1 Вудс Г., Лубинский А. Искривление скважин при бурении. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 161 с.

2 Работа бурильной колонны в скважине / Султанов Б.З., Ишемгузин Е.И., Шаммасов М.Х., Сорокин В.Н. – М.: Недра, 1973. – 217 с.

3 Сесюнин Н. А. Об изгибе весомого стержня в наклонной цилиндрической полости // Изв. ВУЗов “Нефть и газ”. – 1983. – № 9. – С. 22–25.

4 Методика расчета интенсивности искривления ствола наклонной скважины / М.П.Гули-

заде, Л.Я.Кауфман, Л.Я.Сушон. – Тюмень: Типография ГипроТюменнефтегаза, 1975. – 60 с.

5 Григулецкий В. Г. Расчет компоновок бурильной колонны для борьбы с искривлением скважин при роторном и турбинном бурении // Обз. инф.: Сер. Бурение скважин. – М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 1983. – Вып.11. – 56 с.

6 Беляев В.М. Компоновки нижней части бурильной колонны. // ТНТО: сер. Бурение. – М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 1972. – 140 с.

7 Булатов А. И., Аветисян А. Г. Справочник инженера по бурению: В 4-х кн. – М.: Недра, 1993. – Кн. 1. – 320 с.