

## УЗАГАЛЬНЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ ПРИ РОБОТІ НЕОРІЄНТОВАНИХ КОМПОНОВОК НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ДЛЯ РОТОРНОГО СПОСОБУ БУРІННЯ

І.І. Чудик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727137,  
e-mail: chudoman@ukr.net

Розглядаються важливі питання підвищення техніко-економічних показників і енергоефективності буріння нафтових і газових свердловин за рахунок вдосконалення технічних засобів і науково-методичних основ їх проектування і вибору. Охарактеризовано вплив неорієнтованих компоновок низу бурильної колони на процес управління траєкторією буріння свердловини і енергетичні витрати, які виникають при цьому. Проаналізовано світовий досвід вирішення питань проектування, вибору і експлуатації неорієнтованих компоновок низу бурильної колони з різною кількістю опорно-центрувальних елементів. Окрім того, визначено основні підходи і методики, які використовуються під час проектування неорієнтованих компоновок і критерії, що є визначальними при їх виборі для різних задач спрямованого буріння. Досліджено процес фрезерування стінки свердловини робочими елементами опорно-центрувальних елементів при обертанні та осьовому переміщенні неорієнтованих компоновок в гірничій виробці. Для поглиблення рівня досліджень вдосконалено математичні моделі неорієнтованих компоновок низу бурильної колони без центраторів, а також з одним і двома центраторами шляхом врахування розчленування їх конструкцій на окремі елементи з різними значеннями ваги погонного метра та жорсткості на згин, а також згинального моменту у верхній точці контакту колони труб із стінкою свердловини.

Ключові слова: бурильна колона, проектування, сила, вісь, опір, свердловина.

Рассматриваются важные вопросы повышения технико-экономических показателей и энергоэффективности бурения скважин за счет совершенствования технических средств и научно-методических основ их проектирования и выбора. Охарактеризовано влияние неориентированных компоновок низа бурильной колонны на процесс управления траекторией бурения скважины и возникающие при этом энергетические затраты. Проанализирован мировой опыт решения вопросов проектирования, выбора и эксплуатации неориентированных компоновок низа бурильной колонны с различным количеством опорно-центрирующих элементов. Кроме того, определены основные подходы и методики, используемые при проектировании неориентированных компоновок и критерии, которые являются определяющими при их выборе для различных задач направленного бурения. Исследован процесс фрезеровки стенки скважины рабочими элементами опорно-центрирующих элементов при вращении и осевом перемещении неориентированных компоновок в горной выработке. Для углубления уровня исследований усовершенствованы математические модели неориентированных компоновок низа бурильной колонны без центраторов, а также с одним и двумя центраторами путем учета расчленения их конструкций на отдельные элементы с различными значениями веса погонного метра и жесткости на изгиб, а также изгибающего момента в верхней точке контакта труб со стенкой скважины.

Ключевые слова: бурильная колонна, проектирование, сила, ось, сопротивление, скважина.

The article deals with the important issue of increasing technical and economic performance and energy efficiency of drilling oil and gas wells by improving technical means and scientific and methodological foundations of their design and choice. The impact of undirected layouts of the bottom part of the drill string on the management of drilling trajectory and energy costs which are arising have been characterized. The international experience solving design issues, selection and exploitation of the undirected layouts of the bottom part of the drill string with a different number of support-centering elements has been analyzed. In addition, the main approaches and techniques used in the design of the undirected layouts are defined and criteria which are decisive in their choice for different tasks of the directional drilling. The process of milling borehole wall by working elements of the support-centering elements of rotation and axial movement of non-oriented layouts in the mining production.

In order to enhance the level of the research the mathematical models of the undirected layouts of the bottom of the of the drill string without centralizers, as well as with one and two centralizers by taking into account the dismemberment of their structures on individual items with different weight per meter and the bending rigidity and bending moment at the upper contact of tubes with the borehole wall.

Keywords: drill string, design, force axis, resistance, well.

**Вступ.** Під час буріння свердловин основною ланкою управління і передачі механічної і гідравлічної енергії від бурової установки до долота є бурильна колона (БК). Нижня (над долотом) частина БК забезпечує осьове навантаження на долото і задану траєкторію буріння. До її складу входять звичайні і обваженні бу-

рильні труби, перехідники, центратори, калібратори, а у окремих випадках, відхилюючі пристрої. Укомплектована тими чи іншими елементами нижня частина БК отримала назву "компоновка низу бурильної колони" (КНБК).

За особливостями конструкції і призначенням КНБК поділяють на орієнтовані або неоріє-

ентовані. До складу конструкцій орієнтованих компоновок обов'язково включають елемент із заданим прекосом осей (кривий перехідник, відхиляюча пристрої та ін.), які встановлюються в заданому напрямку і дає можливість отримати ділянку свердловини певної кривизни. До складу неорієнтованих КНБК включають опорно-центрувальні елементи (ОЦЕ), що забезпечують центрування низу бурильної колони у свердловині і дотримання певного напрямку буріння.

**Аналіз стану проблеми досліджень.** Основний об'єм буріння свердловин припадає на проходку вертикальних та нахилено-прямо-лінійних стовбурів. Саме для їх проводки використовують неорієнтовані КНБК. Відповідність конструкції і режимів експлуатації неорієнтованих КНБК гірничо-геологічним умовам буріння визначає параметри викривлення осі свердловини, формування стінок свердловини, каверно- і жолобоутворення на них, а також обумовлені енергетичні витрати процесу і техніко-економічні показники буріння.

З теорії і практики буріння відомо, що основним параметром, який характеризує форми рівноваги неорієнтованих КНБК, є її пружна вісь та сили притискання долота і ОЦЕ до стінок свердловини. Внаслідок цього виникають процеси тертя ОЦЕ до гірської породи (ГП), відбувається зношення елементів КНБК та інтенсивне ерозійне руйнування стінок свердловини [1-10 та ін.]. Це погіршує центрування низу бурильної колони в стовбурі свердловини, які характеризуються:

- витратами проектно-траєкторії буріння;
- погіршенням умов відробки доліт;
- каверно- і жолобоутворенням у свердловині;
- зростанням енергетичних витрат процесу поглиблення вибою свердловини і збільшення кошторисної вартості буріння.

**Актуалізація проблеми дослідження.** Не зважаючи на достатньо широку вивченість проблемних питань щодо проектування і вибору неорієнтованих КНБК, актуальною на сьогодні залишається проблема поглиблення досліджень впливу нижньої частини БК на енергетичні витрати процесу буріння при формуванні стінок свердловини довільного проектного профілю тощо.

**Мета дослідження** полягає в розробленні комплексної методики розрахунку енергетичних витрат, пов'язаних із експлуатацією неорієнтованих КНБК для роторного способу буріння на основі результатів цілого ряду власних попередніх досліджень.

Для реалізації поставленої мети автором сформовано такі **науково-практичні задачі**:

1. Розроблення узагальненого підходу до розрахунку енергетичних витрат в процесі ерозійного руйнування стінки свердловини елементами неорієнтованих КНБК під час її обертання.

2. Розроблення узагальненого підходу до розрахунку енергетичних витрат у процесі під час ерозійного руйнування стінки свердловини елементами неорієнтованих КНБК при її осьовому переміщенні в стовбурі свердловини.

3. Розроблення узагальненого підходу до розрахунку статичних форм рівноваги неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ в стовбурі свердловини довільної кривизни.

4. Розроблення узагальненого підходу до розрахунку параметрів защемлення ОЦЕ в свердловині і визначення його впливу статичну форму рівноваги КНБК.

**Реалізація задачі дослідження № 1.** Основним чинником, який обумовлює ерозійне руйнування елементів КНБК і стінок свердловини, є сили притискання долота і ОЦЕ до стінки свердловини [3, 6-8, 10] і їх вдавлення в ГП, що описується в роботах [3, 6-8]:

$$(R_i / n_{nl} b_{nl} h_{nl} l_{nl}) \cdot 10^{-3} \leq K_{II}, \quad (1)$$

де  $R_i$  – реакція стінки свердловини в місці контакту ОЦЕ при її фрезюванні;

$b_{nl}, l_{nl}, n_{nl}$  – ширина і довжина лопаті ОЦЕ та кількість ребер центратора, що одночасно контактують з ГП;

$h_{nl}$  – глибина вдавлення лопаті ОЦЕ в ГП;

$K_{II}$  – коефіцієнт піддатливості стінки свердловини.

$$K_{II} = 2,46 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{b_{nl}}{2 \cdot S} \right]^{1,32} \left[ \frac{E_0}{b_{nl} (1 - \nu^2)} \right], \quad (2)$$

де  $S$  – пружна характеристика ГП.

$$S = \sqrt[3]{\frac{2(1 - \nu)EI}{b_{nl} E_0}}, \quad (3)$$

де  $EI$  – жорсткість на згин КНБК на ділянці встановлення ОЦЕ;

$\nu, E_0$  – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності ГП;

Площа бокового контакту лопаті ОЦЕ і сили опору при фрезюванні нею стінки свердловини під час обертання КНБК відповідно визначається за формулою:

$$S_{PI3} = l_{nl} h_{nl}; \quad (4)$$

$$F_{OII} = \sigma_{СК} S_{PI3}, \quad (5)$$

де  $\sigma_{СК}$  – границя міцності ГП на сколювання.

Із врахуванням сили тертя між ОЦЕ і ГП при фрезюванні стінки свердловини енергетичні витрати на обертання КНБК навколо власної осі визначаються:

$$E_{КНБК}^{ОБ} = \left[ \frac{D_{ОЦЕ}}{2} \left[ \mu \left( \sum_{i=1}^n R_i + Q \right) + F_{OII} \right] + \sum_{i=1}^n M_{Д} \right] \times \frac{\omega h_{БУР}}{V_{МЕХ}}. \quad (6)$$

де  $Q$  – відхиляюча сила на долоті;

$\mu$  – коефіцієнт тертя елементів КНБК до стінки свердловини;

$D_{ОЦЕ}$  – діаметр ОЦЕ;

$M_D$  – робочий момент на долоті під час буріння свердловини;  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання долота;  
 $h_{БУР}$  – довжина інтервалу буріння;  
 $V_{МЕХ}$  – механічна швидкість буріння.

**Реалізація задачі дослідження № 2.** Механічна енергія, яка подається до долота для руйнування вибою свердловини витрачається ще і на осьове переміщення неорієнтованої КНБК внаслідок тертя і ерозійного руйнування ОЦЕ стінки свердловини [7]:

$$E_{КНБК}^{ОС.ОП} = \sum_{i=1}^n F_{ОС.ОП} h_{БУР}, \quad (7)$$

де  $F_{ОС.ОП}$  – сила опору осьового переміщення КНБК у стовбурі свердловини.

• для безопорної КНБК:

$$F_{ОС.ОП} = q L_{КНБК} \mu, \quad (8)$$

де  $L_{КНБК}$ ,  $q$  – довжина і вага погонного метра КНБК;

• для КНБК з одним ОЦЕ:

$$F_{ОС.ОП} = F_{РІЗ_i} + [R_i + q L_{КНБК}] \mu, \quad (9)$$

де  $F_{РІЗ_i}$  – сила опору, обумовлена сколюванням ГП зі стінки свердловини вдавлюванням в неї ОЦЕ.

$$F_{РІЗ_i} = \frac{1377 R_2 (1-\nu^2) [(1-\nu)EI]^{0.44}}{n_{нл} b_{нл}^{0.76} E_0^{1.44} l_{нл} \sigma_{СК}}; \quad (10)$$

• для багатоопорної КНБК:

$$F_{ОС.ОП} = \sum_{i=1}^m (R_i \mu + F_{РІЗ_i}), \quad (11)$$

де  $m$  – кількість ОЦЕ в КНБК.

Механічна енергія, підведена до долота при поглибленні вибою свердловини, визначається за формулою:

$$E_{ДОЛ} = [M_{ПИТ} P + \Delta M] \frac{\omega h_{БУР}}{V_{МЕХ}}, \quad (12)$$

де  $M_{ПИТ}$  – питомий момент на одиницю осьового навантаження на долото  $P$ ;

$\Delta M$  – момент опору обертання долота, обумовлене його конструктивними особливостями.

За винятком енергетичних витрат на осьове переміщення КНБК, залежність (12) набуває вигляду [7]:

• для безопорної КНБК:

$$E_{ДОЛ}^* = [M_{ПИТ} [P - q L_{КНБК} \mu] + \Delta M] \frac{\omega h_{БУР}}{V_{МЕХ}}; \quad (13)$$

• для одноопорної КНБК:

$$E_{ДОЛ}^* = \left[ M_{ПИТ} \left[ P - \left( \frac{1377 R_1 (1-\nu^2)^{-1} (1-\nu)^{0.44}}{n_{нл} b_{нл}^{0.76} E_0^{1.44} l_{нл} EI^{-0.44} \sigma_{СК}^{-1}} + [R_1 + q L_{КНБК}] \mu + A_{dg} S_K \right) \right] + \Delta M \right] \frac{\omega h_{БУР}}{V_{МЕХ}}; \quad (14)$$

• для багатоопорної КНБК:

$$E_{ДОЛ}^* = \left[ \frac{M_{ПИТ}}{R_i^{-1}} \left[ P - \sum_{i=1}^m \frac{1377 (1-\nu^2)^{-1} (1+\mu) \sigma_{СК} E_0^{-1.44}}{n_{нл} l_{нл} b_{нл}^{0.76} ((1-\nu)EI)^{-0.44}} \right] + \Delta M \right] \frac{\omega h_{БУР}}{V_{МЕХ}}, \quad (15)$$

де  $A_{dg}$  – показник адгезії фільтраційної кірки (ФК) на зсув [6-8];

$S_K$  – площа контактування КНБК з ФК, яка покриває стінку свердловини [6-8].

Частка енергії, яка витрачається на подолання сил опору при осьовому переміщенні КНБК у стовбурі свердловини відносно поданої долота визначається:

$$\delta E = \frac{(E_{ДОЛ} - E_{ДОЛ}^*)}{E_{ДОЛ}} \cdot 100\%. \quad (16)$$

**Реалізація задачі дослідження № 3.** Для дослідження енергетичних витрат при осьовому переміщенні і обертанні неорієнтованих КНБК в стовбурі свердловини необхідною умовою є визначення параметрів статичних форм її рівноваги. Для цього пропонується розрахункова схема безопорної КНБК, зображена на рис. 1, а). Вона представлена стрижневою системою, яка складена із елементів різних геометричних розмірів, ваги  $q_1$  та жорсткості на згин  $EI_1$ , загальною довжиною  $l_1$ , з радіальним зазором між ОБТ і нижньою стінкою свердловини у верхній точці їх контактування  $r$ :

$$r = \frac{D_D - D_{ОБТ}}{2}, \quad (17)$$

де  $D_D$ ,  $D_{ОБТ}$  – діаметр долота і ОБТ.

Пружна вісь безопорної КНБК у прямолінійному стовбурі свердловини описується таким диференціальним рівнянням:

$$EI_1 y_1''(x_1) = -P y_1(x_1) + Q x_1 + q_1 x_1^2 \sin(\alpha)/2, \quad (18)$$

де  $y_1(x_1)$  – функція прогину осі КНБК;

$\alpha$  – zenітний кут нахилу стовбура свердловини.

Оскільки неорієнтована КНБК є стисненою частиною БК і під дією поперечних і поздовжніх сил займає стійке положення рівноваги, її вісь набуває вигнутої в бік нижньої стінки свердловини форми, що характеризується радіусом кривизни  $R_{ПХ}(l_1)$  і згинальним моментом  $M(l_1)$ , який його утворює [4]:

$$M(l_1) = \frac{EI_1}{R_{ПХ}(l_1)}, \quad (19)$$

де  $R_{ПХ}(l_1)$  – радіус півхвилі згину КНБК (рис. 1, а).

В результаті інтегрування (19) отримуємо:

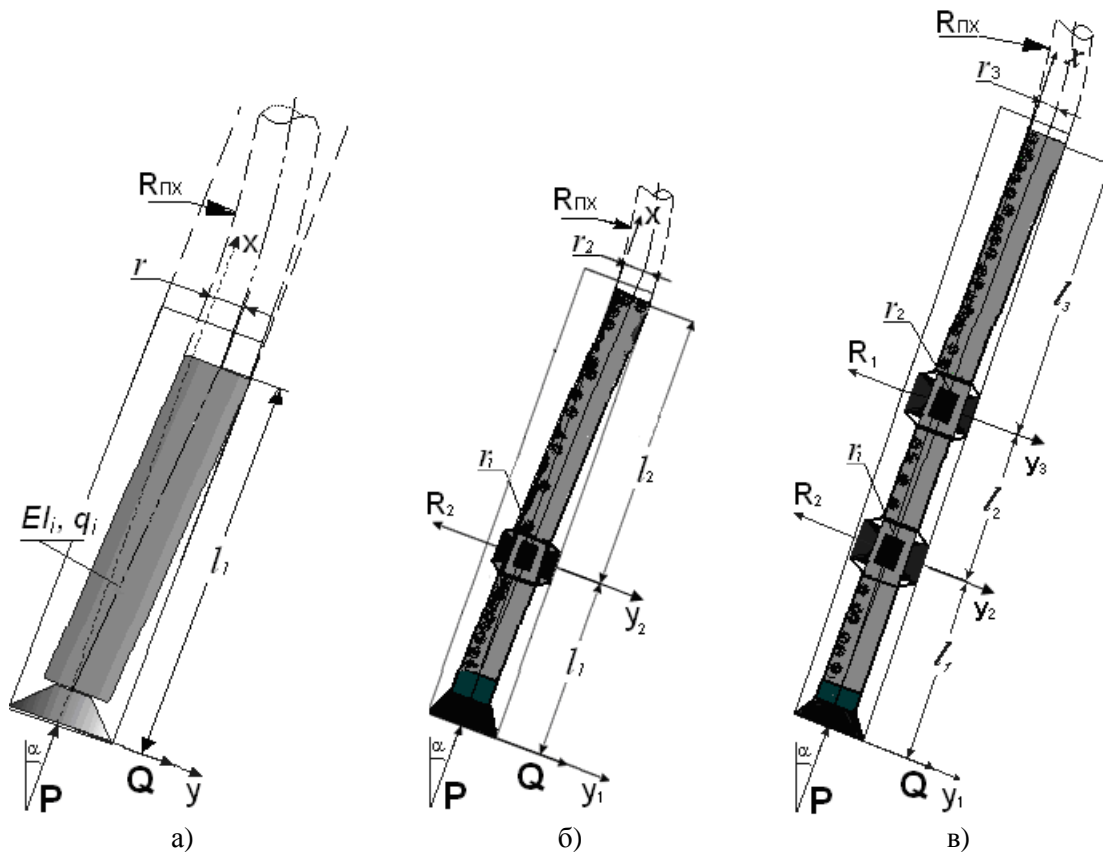


Рисунок 1 – Розрахункові схеми неорієнтованих КНБК у похило-прямолінійному стовбурі свердловини

• функцію зміни прогинів осі КНБК з її довжиною:

$$y_1(x) = A_1 \sin(k_1 x_1) + A_2 \cos(k_1 x_1) + Qx_1 + \left( \left[ \frac{q_1 x_1^2}{2P} \right] - \left[ \frac{q_1}{k_1^2 P} \right] \right) \sin(\alpha), \quad (20)$$

де  $A_i$  – сталі інтегрування;  
 $k_i$  – коефіцієнти жорсткості КНБК на згин:

$$k_i = \sqrt{\frac{P - \sum_{i=1}^N q_i l_i \cos(\alpha)}{EI_i}}, \quad (21)$$

де  $N$  – кількість ділянок КНБК із заданими значеннями  $EI_i$  і  $q_i$ .

• функцію зміни кутів повороту осі КНБК з її довжиною:

$$y_1'(x_1) = k_1 \left( A_1 \cos(k_1 x_1) - A_2 \sin(k_1 x_1) + \frac{[Q + q_1 x_1 \sin(\alpha)]}{Pk_1} \right); \quad (22)$$

• функцію зміни згинального моменту КНБК з її довжиною:

$$M_1(x_1) = k_1^2 EI_1 \left( -A_1 \sin(k_1 x_1) - A_2 \cos(k_1 x_1) + \left( \frac{q_1}{Pk_1^2} \right) \sin(\alpha) \right). \quad (23)$$

Граничні умови розрахункової схеми безопорної неорієнтованої КНБК:

$$\begin{cases} x_1 = 0 \Rightarrow y_1(0) = 0 \\ x_1 = l_1 \Rightarrow \begin{cases} y_1(l_1) = r \\ y_1'(l_1) = 0 \\ M_1(l_1) = \frac{-EI_1}{R_{px}(l_1)} \end{cases} \end{cases} \quad (24)$$

За наведеними граничними умовами (24) складається система рівнянь, розв'язком якої є  $A_i$ ,  $Q$  і  $l_i$ .

Як і для безопорної компоновки, для першої ділянки одноопорної неорієнтованої КНБК згідно з рис. 1, б) характерним є диференціальне рівняння (18), його розв'язок (20) і його похідні (22)-(23), а для другої (вище ОЦЕ) – диференціальне рівняння (25):

$$EI_2 y_2''(x_2) = -[P - q_1 l_1 \cos(\alpha)] y_2(x_2) + Q(l_1 + x_2) - R_2 x_2 + \left( \left( \frac{q_1 l_1^2}{2} \right) + q_1 l_1 x_2 + \left( \frac{q_2 x_2^2}{2} \right) \right) \sin(\alpha). \quad (25)$$

Згідно з рис. 1, б)  $r_1$  – це радіальний зазор між ОЦЕ і стінками свердловини, що визначається як:

$$r_1 = \frac{(D_d - D_{ОЦЕ})}{2}. \quad (26)$$

Величина зазору  $r_2$  між елементом неорієнтованої КНБК і стінкою свердловини у верхній точці їх контактування також визначається із формули (26), тільки  $D_{ОЦЕ} = D_{ОБТ}$ .

В результаті інтегрування диференційного рівняння (25) отримуємо:

• функцію зміни прогинів осі КНБК з її довжиною:

$$y_2(x) = B_1 \sin(k_2 x_2) + B_2 \cos(k_2 x_2) + \frac{(Q(x_2 + l_1) - R_2 x_2)}{(P - q_1 l_1 \cos(\alpha))} + \frac{\left[ \left( \frac{q_2 x_2^2}{2} \right) + \left( \frac{q_1 l_1^2}{2} \right) + q_1 l_1 x_2 - \left( \frac{q_2}{k_2^2} \right) \right]}{(P - q_1 l_1 \cos(\alpha))} \sin(\alpha); \quad (27)$$

• функцію зміни кутів повороту осі КНБК з її довжиною:

$$y_2^I(x_2) = k_2 [B_1 \cos(k_2 x_2) - B_2 \sin(k_2 x_2)] + \frac{(Q - R_2 + (q_1 l_1 + q_2 x_2) \sin(\alpha))}{(P - q_1 l_1 \cos(\alpha))}; \quad (28)$$

• функцію зміни згинального моменту КНБК з її довжиною:

$$M_2(x_2) = k_2^2 EI_2 \left[ -B_1 \sin(k_2 x_2) - B_2 \cos(k_2 x_2) + \frac{q_2 \sin(\alpha)}{(P - q_1 l_1 \cos(\alpha)) k_2^2} \right]; \quad (29)$$

де  $B_i$  – сталі інтегрування.

Граничні умови розрахункової схеми одноопорної неорієнтованої КНБК:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = 0 \Rightarrow y_1(0) = 0 \\ \left. \begin{array}{l} x_1 = l_1 \\ x_2 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_1(l_1) = r_1 \\ y_2(0) = r_1 \\ y_1^I(l_1) = y_2^I(0) \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{l} x_2 = l_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_2(l_2) = r_2 \\ y_2^I(l_2) = 0 \\ M_2(l_2) = \frac{-EI_2}{R_{nx_n}(l_2)} \end{array} \right. \end{array} \quad (30)$$

За наведеними граничними умовами (30) складається система рівнянь, розв'язком якої є  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $Q$ ,  $R_2$  і  $l_2$ .

Як і для безопорної компоновки, згідно з рис. 1, в для першої і другої ділянок двоопорної неорієнтованої КНБК характерними є диференціальні рівняння пружної осі (18) і (25), та їх розв'язки (20), (22), (23), (27-30). Величина радіального зазору  $r_3$  між елементом неорієнтованої КНБК і стінкою свердловини у верхній точці їх контактування визначається із формули (17) за умови, що  $D_{ОЦЕ} = D_{ОБТ}$ . Для третьої ділянки КНБК диференціальне рівняння пружної осі двоопорної неорієнтованої КНБК згідно з рис. 1, в і його розв'язки мають вигляд:

$$EI_3 d^2 y_3 / dx_3^2 = - \left[ P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha) \right] y_3(x_3) + Q \left( \sum_{i=1}^2 l_i + x_3 \right) - R_2(x_3 + l_2) - R_1 x_3 + \quad (31)$$

$$+ \left( \sum_{i=1}^2 \left( \frac{q_i l_i^2}{2} \right) + x_3 \sum_{i=1}^2 q_i l_i + q_1 l_1 l_2 + \frac{q_3 x_3^2}{2} \right) \sin(\alpha);$$

$$y_3(x) = C_1 \sin(k_3 x_3) + C_2 \cos(k_3 x_3) + \frac{\left( Q(x_3 + \sum_{i=1}^2 l_i) - R_2(x_3 + l_2) - R_1 x_3 \right)}{\left( P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha) \right)} + \quad (32)$$

$$+ \frac{\left( \frac{q_3 x_3^2}{2} + \sum_{i=1}^2 \frac{q_i l_i^2}{2} + x_3 \sum_{i=1}^2 l_i + q_1 l_1 l_2 - \frac{q_3}{k_3^2} \right) \sin(\alpha)}{\left( P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha) \right)};$$

$$y_3^I(x_3) = k_3 [C_1 \cos(k_3 x_3) - C_2 \sin(k_3 x_3)] + \frac{\left[ Q - R_1 - R_2 + \left[ \sum_{i=1}^2 q_i l_i + q_3 x_3 \right] \sin(\alpha) \right]}{\left[ P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha) \right]}; \quad (33)$$

$$M_3(x_3) = k_3^2 EI_3 \left[ -C_1 \sin(k_3 x_3) - C_2 \cos(k_3 x_3) + \frac{\left[ q_3 \sin(\alpha) k_3^{-2} \right]}{\left[ P - \sum_{i=1}^2 q_i l_i \cos(\alpha) \right]} \right]; \quad (34)$$

де  $C_i$  – сталі інтегрування.

Граничні умови розрахункової схеми двоопорної неорієнтованої КНБК:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = 0 \Rightarrow y_1(0) = 0 \\ \left. \begin{array}{l} x_1 = l_1 \\ x_2 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_1(l_1) = r_1 \\ y_2(0) = r_1 \\ y_1^I(l_1) = y_2^I(0) \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{l} x_2 = l_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_2(l_2) = r_2 \\ y_3(0) = r_2 \\ y_2^I(l_2) = y_3^I(0) \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{l} x_3 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_3(l_3) = r_3 \\ y_3^I(l_3) = 0 \\ M_3(l_3) = \frac{-EI_3}{R_{nx}(l_3)} \end{array} \right. \end{array} \quad (35)$$

За наведеними граничними умовами (35) складається система рівнянь, розв'язком якої є  $A_i, B_i, C_i, Q, R_i$  і  $l_3$ .

У викривленому стовбурі свердловини радіусом  $R_{CB}$  радіальний зазор у верхній частині контактування ОБТ із стінкою свердловини визначається:

$$B_1 D = \left[ 2R_{CB} \left( \sin\left(\frac{J}{2}\right) \right)^2 + \frac{D_{OBT}}{2\cos(J)} \right], \quad (36)$$

де  $J$  – кут між дотичною до стінки викривленої частини свердловини у верхній точці контактування із нею ОБТ.

Граничні умови розрахункової схеми неорієнтованої КНБК у викривленому стовбурі свердловини:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = 0 \Rightarrow y_1(0) = \frac{-D_D}{2} \\ \\ \left. \begin{array}{l} x_i = l_i \\ x_{i+1} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_i(l_i) = y_i(0) \\ y_i^I(l_i) = y_{i+1}^I(0) \\ y_i^{II}(l_i) = y_{i+1}^{II}(0) \end{array} \right. \quad (37) \\ \\ \left. \begin{array}{l} x_n = l_n \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} y_n(l_n) = r_{НБК} \\ y_n^I(l_n) = J \\ M_n(l_n) = \frac{-EI_n}{R_{CB}} \end{array} \right.$$

де  $r_{НБК}$  – радіальний зазор у верхній частині КНБК.

Для неорієнтованих КНБК з ОЦЕ граничні умови мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(0) = \frac{-D_D}{2} \\ y_i^I(l_i) = y_{i+1}^I(0) \\ y_i(l_i) = y_{i+1}(0) \quad \text{або} \quad \left\{ \begin{array}{l} y_i(l_{OЦЕ}) = r_{OЦЕ} \\ y_{i+1}(0) = r_{OЦЕ} \end{array} \right. \\ y_{n-1}^I(l_{n-1}) = y_n^I(0) \\ y_{n-1}(l_{n-1}) = y_n(0) \\ y_n^I(l_n) = J \\ y_n(l_n) = - \left[ 2R_{CB} \left( \sin\left(\frac{J}{2}\right) \right)^2 + \left( \frac{D_{OBT}}{2\cos(J)} \right) \right] \\ M_n(l_n) = \frac{-EI_n}{R_{CB}} \\ \sum_{i=1}^n l_i = J \left( R_{CB} + \frac{D_D}{2} \right) \end{array} \right. \quad (38)$$

$$r_{OЦЕ} = - \left[ 2R_{CB} \left( \sin\left(\frac{l_{OЦЕ}}{2R_{CB} + D_{OЦЕ}}\right) \right)^2 + \left[ \frac{D_{OЦЕ}}{2} \right] \cdot \left[ \cos\left(\frac{2l_{OЦЕ}}{2R_{CB} + D_{OЦЕ}}\right) \right]^{-1} \right], \quad (39)$$

де  $l_{OЦЕ}$  – віддаль від долота до місця встановлення ОЦЕ.

У відповідності до конструкції КНБК використовуючи граничні умови (37)-(39) і рівності (17), (20)-(23), (26)-(29), (33), (34) формується система рівнянь, розв'язком якої є невідомі величини  $A_i, B_i, C_i, Q, R_i$ .

У випадку, коли  $R_{CB} \rightarrow \infty$  окремі граничні умови (37) і (38) змінюються:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_n^I = J \rightarrow 0 \\ \\ r_{НБК} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left( \left[ \frac{2R_{CB} \left( \sin\left[ \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{2R_{CB} + D_D} \right]^2 + \frac{D_{OBT}}{2\cos\left[ \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{2R_{CB} + D_D} \right]} \right]}{2} \right] \right) \rightarrow \frac{-D_{OББ}}{2} \\ \\ r_{OЦЕ} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left( \left[ \frac{2R_{CB} \left( \sin\left[ \frac{l_i}{2R_{CB} + D_{OЦЕ}} \right]^2 + \frac{D_{OЦЕ}}{2\cos\left[ \frac{2l_i}{2R_{CB} + D_{OЦЕ}} \right]} \right)}{2} \right] \right) \rightarrow \frac{-D_{OЦЕ}}{2} \\ \\ EI_n Y_n^{II} \rightarrow 0 \end{array} \right. \quad (40)$$

При визначенні впливу техніко-технологічних величини  $R_{CB}$  на сили притискання ОЦЕ до стінок свердловини на конкретних прикладах було проведено відповідні розрахунки. Цим отримано позитивне підтвердження того, що при розрахунках і проектуванні неорієнтованих КНБК для буріння ПСС необхідно враховувати параметр ( $R_{CB}$ ) як суттєвий чинник впливу на стійкі форми рівноваги компоновки, [3].

Реалізація задачі дослідження №4. У разі використання ОЦЕ в неорієнтованих КНБК за певних умов можливі різні випадки їх взаємодії із стінками свердловини (рис. 2). Вони обумовлюють різний характер роботи компоновок і дотримання відповідних параметрів проектного профілю свердловини [3].

На рис. 2, а зображено взаємодію ОЦЕ із нижньою стінкою свердловини. Така взаємодія ОЦЕ з нижньою стінкою свердловини є традиційною для розрахунків і математичних моде-

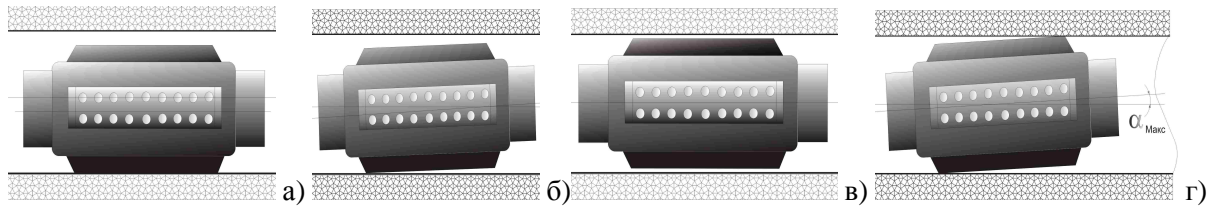


Рисунок 2 – Можливі варіанти взаємодії опор із стінками свердловини

Таблиця 1 – Величина кута защемлення ОЦЕ в стовбурі свердловини

Номинальний діаметр свердловини, мм	Діаметр ОЦЕ, мм							
	190	189	188	187	215	214	213	212
190.5	0.057	0.172	0.287	0.402	-	-	-	-
215.9	-	-	-	-	0.103	0.218	0.333	0.487

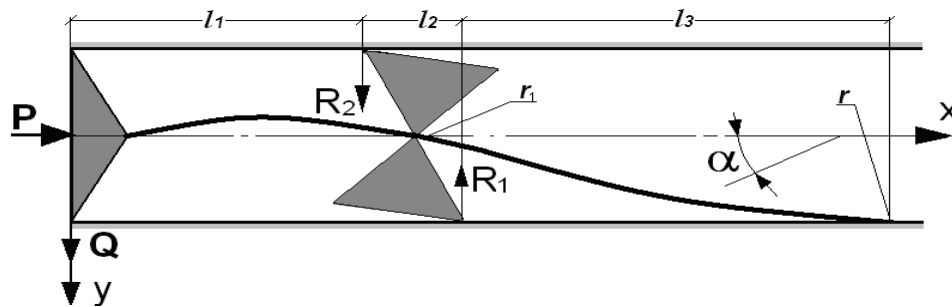


Рисунок 3 – Розрахункова схема неорієнтованої КНБК із защемленим ОЦЕ в стовбурі свердловини

лей компонок. За нею визначається радіальний зазор на ОЦЕ, який приймається при аналітичних дослідженнях КНБК [4, 5, 9 та ін.] та використовуються під час їх проектування. Можливою є одностороння взаємодія ОЦЕ краєм робочої поверхні зі стінкою свердловини (рис. 2, б). Для аналітичної схеми КНБК така взаємодія суттєво впливає на величину радіального зазору і на віддаль між долотом і даним центруючим пристроєм. Відсутність взаємодії ОЦЕ зі стінками свердловини (неповнорозмірного або повнорозмірного – в умовах розширеного стовбура свердловини), як зображено на рис. 2, в, обумовлює суттєві зміни в розрахунковій схемі КНБК, а з ним і в реакціях на ОЦЕ і відхиляючій силі на долоті.

Найскладнішим для забезпечення функціональних можливостей неорієнтованих КНБК є контактування діагонально протилежних крайок робочої поверхні ОЦЕ одночасно з верхньою і нижньою стінкою свердловини (защемлення) (рис. 2, г), що є можливим коли:

1) діаметр ОЦЕ близький до діаметра долота або повно розмірний;

2) кут повороту осі КНБК в місці встановлення ОЦЕ є більшим, ніж максимально допустимий для нього, обумовлений геометричними розмірами.

З практики буріння свердловин із застосуванням неорієнтованих КНБК відомими є моменти, спричинення ОЦЕ до бочкоподібної форми внаслідок тертя її до ГП та його защемлення в свердловині.

У випадку защемлення ОЦЕ в стовбурі свердловини:

- мінімізується вплив розташованої вище від ОЦЕ частини компонок на  $Q$ ;
- погіршується передача осьового навантаження на долото  $P$  і переміщення КНБК у свердловині;
- зменшується енергія, призначена для руйнування долотом вибою свердловини;
- інтенсивно руйнуються торцеві частини ОЦЕ і стінка свердловини.

На розрахунковій схемі одноопорної КНБК [10], яка зображена на рис. 3 показано защемлення ОЦЕ в стовбурі свердловини. Для її розрахунку пропонується метод диференціальних рівнянь.

Для ділянки КНБК між долотом і ОЦЕ характерним буде диференціальне рівняння (18), його розв'язок (21) і похідні (22 і 23). Для ділянки ОЦЕ записується диференціальне рівняння (26), розв'язок (27) і рівняння (28) і (29), (31) і (34). У відповідності до граничних умов (35) складають систему рівнянь. Її розв'язками є відхиляюче зусилля на долоті  $Q$ , реакції  $R_1$  і  $R_2$  на ОЦЕ і сталі інтегрування.

### Висновки

1. Для вивчення впливу нижньої частини бурильної колони на енергетичні витрати процесу буріння, зокрема під час формування стінки свердловини, і забезпечення параметрів їх проектного профілю розроблено узагальнену методику. В її основі закладено результати проведених раніше автором аналітичних досліджень, які ґрунтуються на розрахунках складних математичних моделей неорієнтованих КНБК у різних техніко-технологічних умовах.

2. Використовуючи окремо і в комплексі підходи, які є складовими частинами вище запропонованої методики, було встановлено:

2.1. Фрезування стінки свердловини лопатями ОЦЕ обумовлює необхідність збільшення енергії для обертання неорієнтованих КНБК від 2 до 8 разів в залежності від zenітного кута свердловини. Встановлення в КНБК кожного наступного ОЦЕ з метою стабілізації інтенсивності викривлення збільшує енергетичні витрати на її обертання на 6 %, [8].

2.2. Значний вплив на енергетичні витрати на осьове переміщення неорієнтованих КНБК в свердловині має його zenітний кут, який є домінуючим чинником впливу на притискання ОЦЕ до стінок свердловини і, відповідно, передумовою зміни моменту на обертання БК загальом. Так, при  $\alpha = (1^0 - 75^0)$  для безопорних КНБК енергетичні витрати зростають в 1-1,3 рази, для одноопорних – в 1-4,2, для двоопорної – в 1-4,5, а для триопорної – в 1-6 разів, [7]. Слід відмітити, що найбільшими прояви впливу zenітного кута свердловини на фрезування її стінки є характерними у м'яких і нестійких ГП.

2.3. Встановлено якісний вплив  $R_{ПХ}(l_i)$  на сили притискання ОЦЕ ( $Q$  і  $R_i$ ) до стінок свердловини. Для неорієнтованої безопорної КНБК при зміні величини  $R_{ПХ}$  від 600 м до 6000 м величина  $Q$  збільшується в 7 разів; для одноопорної вона зменшується в 6 разів, а для двоопорних – спадає удвічі. Для одноопорної КНБК реакція на ОЦЕ збільшуються у 4.5 рази; для двоопорних – в 2.3 рази на нижньому ОЦЕ і в 1.6 разів – на верхньому. Отримані на прикладі результати розрахунків вказують на необхідність врахування при проектуванні неорієнтованих КНБК згину її верхньої частини радіусом  $R_{ПХ}$  як чинника впливу на їх ефективність і енергоємність роботи.

2.4. Защемлення в стовбурі свердловини номінального діаметра ОЦЕ (у даному випадку 214 і 215,9 мм), незалежно від осьового навантаження на долоті стає причиною зміни відхиляючого зусилля на долоті  $Q$  більше ніж на 30%, а реакції на ОЦЕ – до 15%. Для підвищення ефективності неорієнтованих КНБК за таких умов є необхідним врахування умов контактування ОЦЕ зі стінками свердловини.

3. Приведена узагальнена методика розрахунку енергетичних витрат при роботі нижньої частини бурильної колони в свердловині розширює можливості визначення кількісних і якісних її характеристик та більш точно вибирати режими експлуатації. Оскільки вона опирається на вдосконалення математичних моделей неорієнтованих КНБК в прямолінійних і викривлених стовбурах свердловини з можливістю використання в них різноманітних пристроїв для підвищення якості центрування низу бурильних колон в нафтогазових гірничих виробках, її основним призначенням є вирішення важливої науково-практичної задачі буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин в умовах забезпечення якості і енергоефективності.

1 Гречин Е.Г. Разработка и исследование методов проектирования и работы неориентируемых компоновок низа бурильной колонны: автореф. дис. на соиск. науч. ст. д-ра технических наук: спец.25.00.15. "Технология бурения и освоения скважин" / Е. Г. Гречин, Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень, 2009. – 47 с.

2 Григулецкий В.Г. Проектирование компоновок нижней части бурильной колонны [Текст] / В. Г. Григулецкий, В. Т. Лукьянов. – М.: Недра, 1990. – 304 с.

3 Чудик І.І. Врахування каверно- і жолобоутворення при проектуванні неорієнтованих КНБК [Текст] / І.І. Чудик, А.А. Юрич, А.А. Козлов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2(23). – С. 45-50.

4 Чудик І.І. Удосконалення методики розрахунку сил притискання опор неорієнтованих КНБК до стінок свердловини [Текст] / І.І. Чудик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 3(28). – С. 35-41.

5 Чудик І.І. Нові можливості вдосконалення неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / І.І. Чудик, А.Р. Юрич // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – 2010. – Вып. 13. – С. 117-122.

6 Крижанівський Є. І. Розширення технологічних можливостей та оцінювання енергоефективності роботи неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / Є. І. Крижанівський, І. В. Воєвідко, І. І. Чудик // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сборник научных трудов. – 2010. – Вып. 13. – С. 25-30.

7 Крижанівський Є. І. Енергетичні втрати, зумовлені силами опору осьового переміщення неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / Є. І. Крижанівський, І. І. Чудик, В. Р. Осадца // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 1(12). – С. 39-41.

8 Крижанівський Є. І. Енергетичні втрати на обертання неорієнтованих КНБК у процесі буріння свердловини. [Текст] / Є. І. Крижанівський, І. І. Чудик, О. Ю. Витязь, О. І. Дерді // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 2 (35). – С. 36-40.

9 Чудик І.І. Розширення можливостей неорієнтованих компоновок низу бурильної колони [Текст] / І.І. Чудик, В.Р. Осадца, КС. Дзядик // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 2(24). – С. 7-13.

10 Підвищення технологічних можливостей неорієнтованих компоновок низу бурильної колони для буріння в ускладнених умовах / І. І. Чудик, Л. Д. Пітулей, І. В. Підберезький, Ю. В. Буй, М. В. Коваль // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2011. – Вип. 14(181). – С. 127-134. – Серія гірничо-геологічна.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
19.09.13

Рекомендована до друку  
професором Коцкуличем Я.С.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Бондаренком М.О.  
(Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В.М.Бакуля НАН України, м. Київ)