

## РОЗШИРЕНА МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАТРАТ, СПРИЧИНЕНИХ РОБОТОЮ НЕОРІЄНТОВАНИХ КОМПОНОВОК НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

І.І. Чудик

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 717967,  
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 при проектуванні неорієнтованих компоновок і критерії, що є визначальними при їх виборі для різних задач спрямованого буріння. Досліджено процес фрезкування стінки свердловини робочими елементами опорно-центрувальних елементів при обертанні та осьовому переміщенні неорієнтованих компоновок в гірничій виробці. Представлено методику розрахунку енергетичних затрат, які зумовлені роботою неорієнтованих компоновок низу бурильної колони з різною кількістю опорно-центрувальних елементів. В якості непродуктивного процесу розглядається фрезкування стінок свердловини опорно-центрувальними елементами. Запропоновано новий критерій для вибору енергоефективних неорієнтованих компоновок, залежно від зміни різноманітних техніко-технологічних параметрів процесу буріння скерованих свердловин. На основі проведених розрахунків визначено енергоефективні конструкції неорієнтованих компоновок.

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 энергетические затраты, которые возникают при этом. 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 фрезерования стенки скважины рабочими элементами опорно-центрирующих элементов при вращении и осевом перемещении неориентированных компоновок в горной выработке. Представлена методика расчета энергетических потерь, обусловленных работой неориентированных компоновок низа бурильной колонны с разным количеством опорно-центрирующих элементов. В качестве непродуктивного процесса рассматривается фрезерование стенок скважины опорно-центрирующими элементами. Предложен новый критерий для выбора энергоэффективных неориентированных компоновок, в зависимости от изменения различных технико-технологических параметров процесса бурения направленных скважин. На основе проведенных расчетов определены энергоэффективные конструкции неориентированных компоновок.

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

The article deals with the important issue of increasing technical and economic performance and efficiency of oil and gas well drilling by improving facilities and scientific and methodological basis of their design and selection. The influence of non-oriented configurations of the bottom-hole assembly on the drilling trajectory control and generated energy costs were characterized. The international experience issues of design, selection and operation of non-oriented configurations of the bottom-hole assembly with a range of centralizing and supporting elements were analyzed. In addition, the main approaches and techniques used in the design and non-oriented configurations and determining criteria for different tasks of directional drilling were analyzed. The milling process using centralizing and supporting elements of the well wall during rotation and axial movement of non-oriented configurations in the mine opening was studied. The calculation method of energy losses generated by application of non-oriented configurations of the bottom-hole assembly with different amount of centralizing and supporting elements was developed. The milling of well walls using centralizing and supporting elements is considered as non-efficient. The new criterion for selection of the energy-efficient non-oriented configurations of the bottom-hole assembly depending on changes in technical and technological process of the directional well drilling. Based on the calculations, the energy-efficient non-oriented configurations of the bottom-hole assembly were identified.

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

### Вступ

Важливий момент у реалізації процесу буріння свердловин відіграє бурильна колона (БК) та її наддолотна система – компоновка ни-

зу бурильної колони (КНБК), яка призначена для управління проектною траєкторією при заданих режимно-технологічних параметрах. Для цього КНБК повинна відповідати високим экс-

платуаційним вимогам, що обумовлюються техніко-технологічними і гірничо-геологічними умовами буріння, а також володіти показниками надійності, довговічності. Більшу частину стовбура вертикальних (під кондуктор, технічні і експлуатаційні колони) та частково похило-скерованих і горизонтальних свердловин бурять із використанням неорієнтованих КНБК, [1-5].

Практика використання неорієнтованих КНБК під час буріння таких свердловин довела не тільки їх високу технологічну роль, але й показала їх негативні експлуатаційні характеристики, одна з яких – це енергозатратність. Особливо негативно цей характеристичний параметр проявляє себе для багатоопорних (жорстких) неорієнтованих КНБК, [8]. Вони нерідко стають причинами ускладнених спуско-підймальних операцій (СПО), спричиняють погіршення транспортування шламу, підвищують гідравлічні втрати у кільцевому просторі, зменшують осьове навантаження та крутний момент на долоті тощо. Так, необліковані, на думку автора, витрати енергії в процесі використання неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ для управління траєкторією буріння свердловин, на практиці досі залишаються поза увагою. Це і обумовлює актуалізацію питання розроблення науково-практичного підходу щодо розвитку наукових основ проектування і вибору параметрів конструкції і умов експлуатації нижньої частини бурильної колони за умов енергоефективності та забезпечення максимального коефіцієнта корисної дії (ККД) на долоті.

Опираючись на наведене вище, метою даного дослідження є розроблення методики прогнозування енергетичних затрат, спричинених роботою неорієнтованих КНБК, для вдосконалення їх конструктивних і експлуатаційних параметрів.

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

1. Узагальнення чинників енергетичних затрат під час роботи неорієнтованих КНБК.
2. Формування підходу щодо визначення статичних форм рівноваги неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини довільної кривизни.
3. Вивчення впливу статичних форм рівноваги неорієнтованих КНБК на енергозатрати процесу їх експлуатації в стовбурі свердловини.
4. Розроблення рекомендацій щодо проектування і вибору енергоефективних неорієнтованих КНБК.

### Виклад основного матеріалу

Одним із домінуючих чинників зниження ККД на долоті є опір осьового переміщення неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини. Для їх подолання витрачається енергія, яка описується наступною залежністю [6]:

$$\Delta E_{ОП} = \sum_{i=1}^n (F_{O_i} \Delta h + \mu R_i), \quad (1)$$

де  $F_{O_i}$  - сила опору при осьовому переміщенні неорієнтованої КНБК у стовбурі свердловини, обумовлена взаємодією її елементів із стінкою свердловини, рис. 1;

$\Delta h$  - довжина інтервалу буріння;

$R_i$  - реакція на ОЦЕ;

$\mu$  - коефіцієнт тертя ОЦЕ до стінки свердловини;

$n$  - кількість ОЦЕ в КНБК.

Енергія, необхідна для подолання сил тертя під час обертання КНБК у стовбурі свердловини, (за умови обертання навколо власної осі) визначається, [7]:

$$\Delta E_{ОБ} = 2\pi (M_{ДОЛ} + \sum_{i=1}^n M_{ОЦЕ_i}), \quad (2)$$

де  $M_{ДОЛ}$ ,  $M_{ОЦЕ_i}$  - момент опору тертя під час обертання долота і ОЦЕ при відповідних значеннях осьового навантаження  $P_i$  (рис. 1).

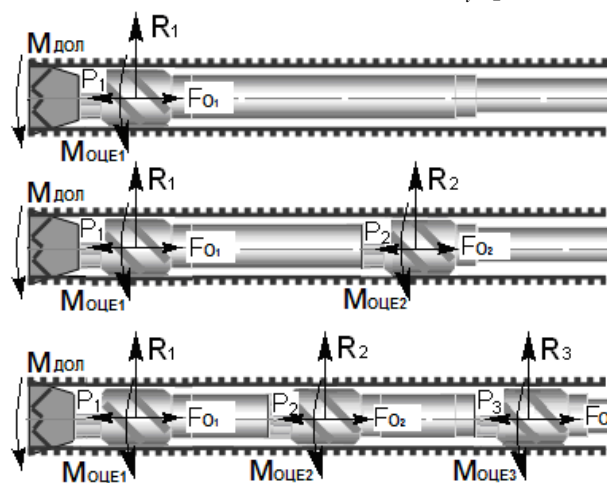


Рисунок 1 – Схеми конструкцій неорієнтованих КНБК

Загальні енергетичні витрати на подолання зазначених вище сил і моментів опору під час роботи неорієнтованих КНБК (без урахування опору в'язкого бурового розчину) визначаються за формулою:

$$E_{КНБК} = \sum_i^m (\Delta E_{ОП_i} + \Delta E_{ОБ_i}), \quad (3)$$

де  $m$  - кількість обертів долота під час проходження інтервалу довжиною  $\Delta h$ .

Техніко-технологічними параметрами під час роботи неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини є притискання ОЦЕ до стінки свердловини з реакціями  $R_i$  та відхиляюча сила на долоті  $Q$  [1-7 та ін.]. Вони є визначальними факторами величин  $F_{O_i}$ ,  $M_{ДОЛ}$ ,  $M_{ОЦЕ_i}$ . Для їх оцінювання необхідною умовою є використання відповідних математичних моделей неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ, які описуються в працях [4-7].

Відповідно до зображених на рис. 2 схем неорієнтованих КНБК представлені стрижневими системами, які складаються із ділянок різної

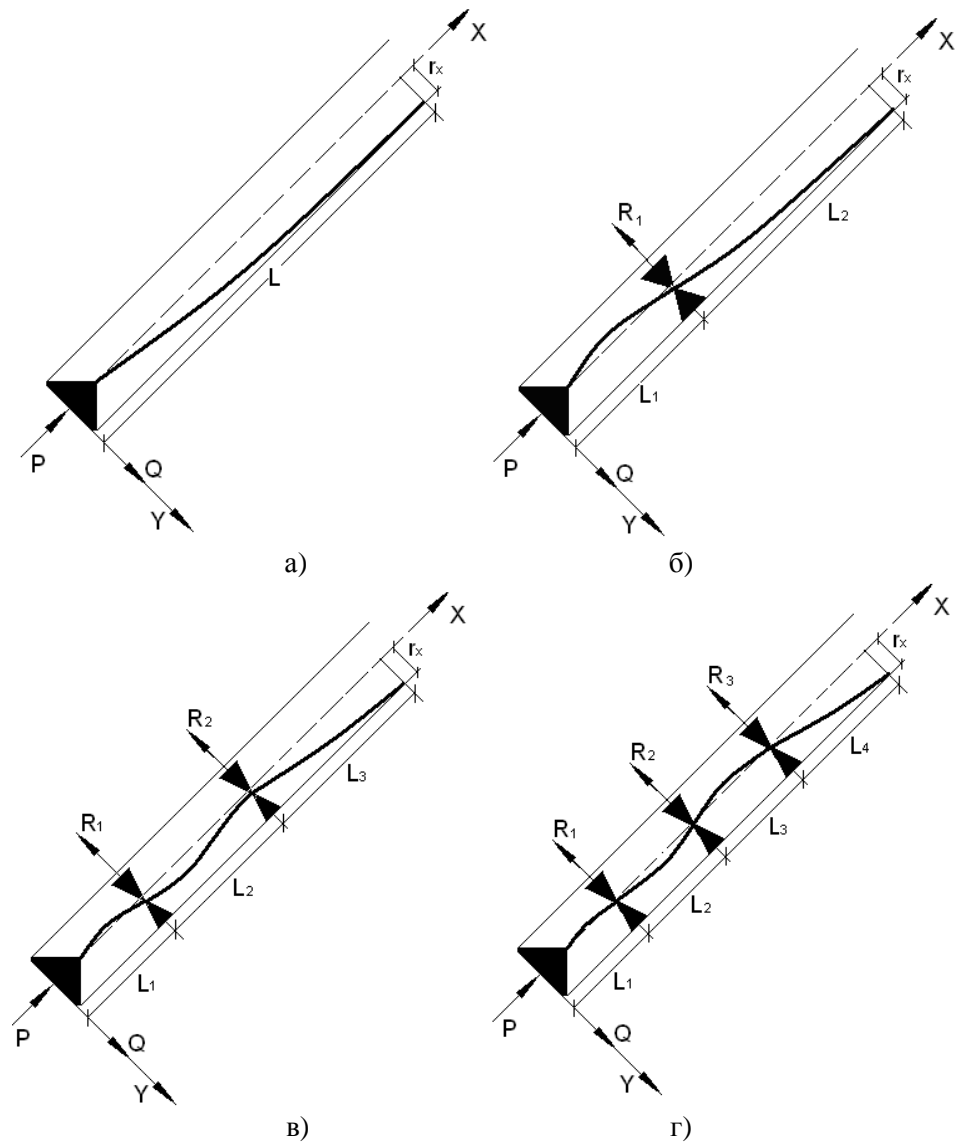


Рисунок 2 – Розрахункові схеми неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ

власної ваги, жорсткості, геометричних розмірів, можуть включати ОЦЕ, що і визначають положення осі КНБК у свердловині. Під дією осьового навантаження на долоті  $P$ , поперечної і повздовжньої складових ваги в похило-прямолінійному стовбурі свердловини, пружна вісь КНБК набуває пружної форми згину, яка описується відповідними диференційними рівняннями [4-7].

Для безопорної компоновки (рис. 2, а), а також перших ділянок КНБК з 1-м, 2-а, 3-а ОЦЕ (рис. 2, б-г), згин її пружної осі описується рівнянням:

$$EI y_1''(x_1) = -P y_1(x_1) + Q x_1 + \frac{q x_1^2 \sin \alpha}{2}, \quad (4)$$

де  $EI$ ,  $q_i$  – жорсткість на згин і вага погонного метра ділянки КНБК;

$\alpha$  – zenітний кут нахилу осі свердловини.

Для ділянки КНБК між 1-м і 2-м ОЦЕ (рис. 2, в і г) та ділянки над ОЦЕ для КНБК (рис. 2, б) згин її пружної осі описується рівнянням:

$$EI y_2''(x_2) = -[P - q l_1 \cos \alpha] y_2(x_2) + Q(l_1 + x_2) + q \left( \frac{l_1^2}{2} + l_1 x_2 + \frac{x_2^2}{2} \right) \sin \alpha - R_1 x_2. \quad (5)$$

Для ділянки КНБК між 2-м і 3-м ОЦЕ (рис. 2, г) та ділянки над 2-м ОЦЕ для КНБК (рис. 2, в) згин її пружної осі описується рівнянням:

$$EI y_3''(x_3) = - \left[ P - \sum_{i=1}^2 q l_i \cos \alpha \right] y_3(x_3) + Q \left( \sum_{i=1}^2 l_i + x_3 \right) + q \left( \sum_{i=1}^2 \frac{l_i^2}{2} + x_3 \sum_{i=1}^2 l_i + l_1 l_2 + \frac{x_3^2}{2} \right) \sin \alpha - R_2 x_3 - R_1 (x_3 + l_2). \quad (6)$$

Згин пружної осі для триопорної компоновки (рис. 2, г) на ділянці вище третього ОЦЕ описується рівнянням:

$$EIy_4''(x_4) = - \left[ P - \sum_{i=1}^3 ql_i \cos \alpha \right] y_4(x_4) + \quad (7)$$

$$+ Q \left( x_4 + \sum_{i=1}^3 l_i \right) - R_3 x_4 - R_2(x_4 + l_3) - R_1(x_4 + \sum_{i=2}^3 l_i) +$$

$$+ q \left( \sum_{i=1}^4 \frac{l_i^2}{2} + l_3 \sum_{i=1}^2 l_i + l_4 \sum_{i=1}^3 l_i + x_4 \sum_{i=1}^4 l_i + l_1 l_2 + \frac{x_4^2}{2} \right) \sin \alpha.$$

Для можливості реалізації представлених на рис. 2 розрахункових схем неорієнтованих КНБК у прямолінійному стовбурі свердловини характерними є такі граничні умови:

Долото:  $x_1 = 0 \Rightarrow y_1(0) = 0;$

ОЦЕ:  $\left. \begin{matrix} x_i = l_i \\ x_{i+1} = 0 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \begin{cases} y_i(l_i) = y_{i+1}(0) = r_i; \\ y_i'(l_i) = y_{i+1}'(0); \\ y_i''(l_i) = y_{i+1}''(0); \end{cases} \quad (8)$

Верхня точка:  $x_n = l_n \Rightarrow \begin{cases} y_n(l_n) = r_x; \\ y_n'(l_n) = 0; \\ y_n''(l_n) = 0. \end{cases}$

де  $l_n$  – довжина ділянки безопорної КНБК від долота до верхньої точки її контакту із стінкою свердловини;

$r_i$  і  $r_x$  – радіальні зазори між осями свердловини і КНБК у місці встановлення ОЦЕ діаметром  $D_{ОЦЕ}$  та у верхній точці контакту із стінкою, (наприклад ОБТ, зовнішнім діаметром  $D_{ОБТ}$ ) відповідно:

$$r_i = \frac{D_d - D_{ОЦЕ}}{2}; \quad (9)$$

$$r_x = \frac{D_d - D_{ОБТ}}{2}, \quad (10)$$

де  $D_d$  – діаметр долота.

Для можливості реалізації представлених на рис. 2 розрахункових схем неорієнтованих КНБК в умовах викривленого стовбура свердловини радіусом  $R_{СВ}$  необхідною умовою є врахування зміни радіального зазору  $r_i$  на ОЦЕ та верхній точці контакту КНБК із стінкою, які визначаються:

$$r_i = - \left[ 2R_{СВ} \left( \sin \frac{l_{ОЦЕ}}{2R_{СВ} + D_{ОЦЕ}} \right)^2 + \frac{D_{ОЦЕ}}{2} \times \left( \cos \frac{2l_{ОЦЕ}}{2R_{СВ} + D_{ОЦЕ}} \right)^{-1} \right], \quad (11)$$

де  $l_{ОЦЕ}$  – відстань від долота до місця встановлення ОЦЕ в КНБК.

$$r_x = 2R_{СВ} \left( \sin \frac{J}{2} \right)^2 + \frac{D_{ОБТ}}{2 \cos(J)}, \quad (12)$$

де  $J = y'(x)$  – кут між дотичною до стінки викривленої частини свердловини у верхній точці контактування із нею ОБТ.

Реалізація граничних умов (8)-(12) із вказаними вище поправками на викривлення стовбура свердловини (11) і (12), а також

$y_{i+1}''(l_n) = \frac{-EI_n}{R_{СВ}}$  та  $y_n'(l_n) = J$  для будь-якої із конструкції КНБК (рис. 2) можлива шляхом інтегрування диференціальних рівнянь (4)-(7), які відображають певні величини:

• функція зміни прогинів осі КНБК за її довжиною:

$$y_1(x) = A_1 \sin(k_1 x_1) + A_2 \cos(k_1 x_1) + Qx_1 + q \left( \frac{x_1^2}{2P} - \frac{1}{k_1^2 P} \right) \sin \alpha; \quad (13)$$

$$y_2(x) = B_1 \sin(k_2 x_2) + B_2 \cos(k_2 x_2) + \frac{Q(x_2 + l_1) - R_1 x_2}{P - ql_1 \cos(\alpha)} + q \frac{\left( x_2^2/2 \right) + \left( l_1^2/2 \right) + l_1 x_2 - \left( 1/k_2^2 \right)}{P - ql_1 \cos \alpha} \sin \alpha; \quad (14)$$

$$y_3(x) = C_1 \sin(k_3 x_3) + C_2 \cos(k_3 x_3) + \frac{Q(x_3 + \sum_{i=1}^2 l_i) - R_1(x_3 + l_2) - R_2 x_3}{P - \sum_{i=1}^2 ql_i \cos \alpha} + q \left( \frac{x_3^2}{2} + \sum_{i=1}^2 \frac{l_i^2}{2} + x_3 \sum_{i=1}^2 l_i + l_1 l_2 - \frac{1}{k_3^2} \right) \sin \alpha; \quad (15)$$

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

$$y_4(x) = D_1 \sin(k_4 x_4) + D_2 \cos(k_4 x_4) + \quad (16)$$

$$+ \frac{Q(x_4 + \sum_{i=1}^3 l_i) - R_1(x_4 + l_2 + l_3) - R_2(x_4 + l_3) - R_3 x_4}{P - \sum_{i=1}^3 ql_i \cos \alpha} + q \left( \frac{x_4^2}{2} + \sum_{i=1}^3 \frac{l_i^2}{2} + x_4 \sum_{i=1}^3 l_i + l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3 - \frac{1}{k_4^2} \right) \sin \alpha; \quad (17)$$

де  $A_i, B_i, C_i, D_i$  – сталі інтегрування;  
 $k_i$  – коефіцієнти жорсткості КНБК на згин:

$$k_i = \sqrt{\frac{P - \sum_{i=1}^j ql_i \cos \alpha}{EI_i}}, \quad (17)$$

де  $j$  – кількість ділянок КНБК.

• функція зміни кутів повороту осі КНБК з її довжиною:

$$y_1^I(x_1) = k_1 \left[ A_1 \cos(k_1 x_1) - A_2 \sin(k_1 x_1) + \frac{Q + q x_1 \sin \alpha}{P k_1} \right]; \quad (18)$$

$$y_2^I(x_2) = k_2 \left[ B_1 \cos(k_2 x_2) - B_2 \sin(k_2 x_2) \right] + \frac{Q - R_2 + q(l_1 + x_2) \sin \alpha}{P - q l_1 \cos \alpha}; \quad (19)$$

$$y_3^I(x_3) = k_3 \left[ C_1 \cos(k_3 x_3) - C_2 \sin(k_3 x_3) \right] + \frac{Q - R_1 - R_2 + q \left( \sum_{i=1}^2 l_i + x_3 \right) \sin \alpha}{P - \sum_{i=1}^2 q l_i \cos \alpha}; \quad (20)$$

$$y_4^I(x_4) = k_4 \left[ D_1 \cos(k_4 x_4) - D_2 \sin(k_4 x_4) \right] + \frac{Q - R_1 - R_2 - R_3 + q \left( \sum_{i=1}^3 l_i + x_4 \right) \sin \alpha}{P - \sum_{i=1}^3 q l_i \cos \alpha}; \quad (21)$$

• функція зміни згинальних моментів осі КНБК за її довжиною:

$$M_1(x_1) = k_1^2 EI_1 \left[ -A_1 \sin(k_1 x_1) - A_2 \cos(k_1 x_1) + \left( \frac{q}{P k_1^2} \right) \sin \alpha \right]; \quad (22)$$

$$M_2(x_2) = k_2^2 EI_2 \left[ -B_1 \sin(k_2 x_2) - B_2 \cos(k_2 x_2) + \frac{q \sin \alpha}{(P - q l_1 \cos \alpha) k_2^2} \right]; \quad (23)$$

$$M_3(x_3) = k_3^2 EI_3 \left[ -C_1 \sin(k_3 x_3) - C_2 \cos(k_3 x_3) + \frac{q \sin \alpha k_3^{-2}}{P - \sum_{i=1}^2 q l_i \cos \alpha} \right]; \quad (24)$$

$$M_4(x_4) = k_4^2 EI_4 \left[ -D_1 \sin(k_4 x_4) - D_2 \cos(k_4 x_4) + \frac{q \sin \alpha k_4^{-2}}{P - \sum_{i=1}^3 q l_i \cos \alpha} \right]. \quad (25)$$

Відтак, за відповідними граничними умовами (8)-(12) для кожної із розрахункових схем (рис. 2, а-г), у поєднанні із залежностями (13)-(25) складаються характерні системи рівнянь, результатами розв'язування яких є невідомі  $Q$ ,  $R_i$ ,  $l_j$  та інші невідомі величини.

Притискання ОЦЕ до стінки свердловини обумовлює її фрезування при обертанні і осьо-

вому переміщенні КНБК, що сприяє зростанню сил тертя і призводить до зменшення осьового навантаження на долото. Одним із характеристикних параметрів при цьому є величина  $F_{O_i}$ , яка використовується в залежності (1). Для її визначення використовують умову втискування ОЦЕ в стінку свердловини на глибину  $\Delta_i$  [6, 7]:

$$\Delta_i = \frac{R_i}{n_{nl} b_{nl} K l_{nl}}, \quad (26)$$

де  $n_{nl}$ ,  $b_{nl}$ ,  $l_{nl}$  – кількість, ширина і довжина лопаті на ОЦЕ відповідно;

$K$  – коефіцієнт піддатливості стінки свердловини, [6, 7]:

$$K = 2,46 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \frac{b_{nl}}{2S} \right]^{1,32} \frac{E_0}{b_{nl} (1-\nu^2)}, \quad (27)$$

де  $S$  – пружна характеристика ГП, [6, 7]:

$$S = \sqrt[3]{\frac{2(1-\nu)EI}{b_{nl} E_0}}, \quad (28)$$

де  $\nu$  і  $E_0$  – коефіцієнт Пуасона і модуль пружності ГП, [6, 7].

Сила опору при сколюванні ГП ОЦЕ визначається:

$$F_{O_i} = \sigma_{СК} S_{PIZ_i}, \quad (29)$$

де  $S_{PIZ_i}$  – площа різання планкою ОЦЕ ГП;

$\sigma_{СК}$  – межа міцності ГП на сколювання;

• при осьовому переміщенні КНБК:

$$S_{PIZ_i} = b_{nl} \Delta_i, \quad (30)$$

• при обертанні КНБК:

$$S_{PIZ_i} = l_{nl} \Delta_i. \quad (31)$$

Із врахуванням вищенаведеного моменти опору  $M_{ОЦЕ_i}$ ,  $M_{ДОЛ}$ , при обертанні КНБК навколо її осі визначають з виразів:

$$M_{ОЦЕ_i} = \frac{D_{ОЦЕ_i}}{2} [\mu R_i + F_{O_i}]; \quad (32)$$

$$M_{ДОЛ} = \frac{\mu Q D_{Д}}{2}. \quad (33)$$

Критерієм вибору енергоефективної неорієнтованої КНБК за цих умов слід вважати їх питому енергоємність, яка визначається:

$$\varepsilon = \frac{E_{КНБК}}{L_{КНБК}}, \quad (34)$$

де  $L_{КНБК}$  – довжина КНБК.

Запорукою енергоефективності КНБК при цьому слід вважати відповідність умов  $\varepsilon \rightarrow 0$  при  $Q \cong const$ .

Опираючись на вищенаведене, запропоновано такий алгоритм визначення енергетичних затрат, обумовлених роботою неорієнтованих КНБК.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку КНБК

Кількість ОЦЕ, шт	Діаметри, мм			$L_i$ , м	P, кН	$\alpha$ , град	$b_{пл}$ , м	$l_{пл}$ , м	$n_{пл}$ , шт	$\nu$	$\sigma_{ск}$ , МПа	$\mu$	$E_0$ , Па
	$D_d$	$D_{ОЦЕ}$	$D_{ОБТ}$										
1		190		0-5									
2	190,5	190/190	146	6/16	100	1-30	0.04	0.3	4	0.25	20	0.3	$(0.8-1.6) \times 10^{10}$
3		190/190/190		6/16/20									

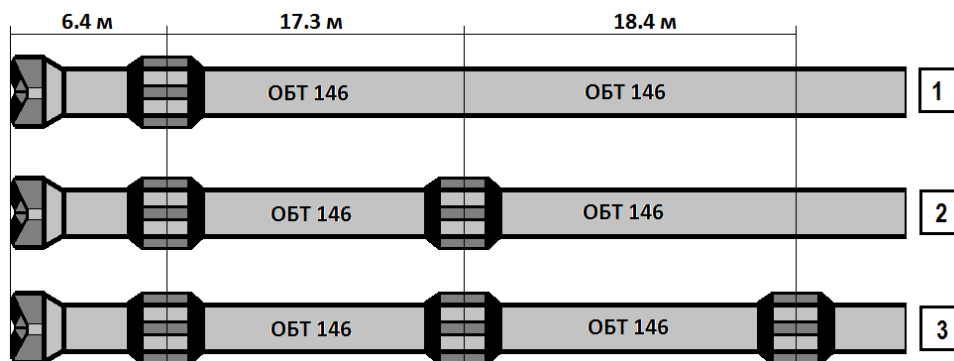


Рисунок 3 – Геометричні параметри КНБК з різною кількістю ОЦЕ, які використано в розрахунках

1. Залежно від конструктивних параметрів неорієнтованої КНБК (кількості ОЦЕ в складі її конструкції) відповідно до рис. 2 вибирають розрахункову схему.

2. Використовуючи характерні для вибраної розрахункової схеми диференціальні рівняння (4)-(7), їх розв'язки (13)-(25) і граничні умови (8)-(12), формують відповідну систему рівнянь і визначають потрібні в подальшому значення  $Q$  та  $R_i$  при відповідних вхідних техніко-технологічних параметрах.

3. За залежностями (26)-(33) визначають величини  $M_{ОЦЕ}$  і  $M_{дол}$ , а за (1)-(3) – величини  $\Delta E_{оп}$ ,  $\Delta E_{об}$  і  $E_{КНБК}$ .

4. Використовуючи залежність (34), визначають величину  $\mathcal{E}$ , за значенням якої характеризується енергоємність компоновки серед запропонованих до застосування.

За допомогою розробленої методики досліджено вплив параметрів КНБК та інших техніко-технологічних чинників на їх енерговитратність під час роботи в стовбурі свердловини при певних вихідних параметрах (табл. 1, рис. 3). При цьому було отримано низку графічних залежностей (рис. 4-7).

За результатами проведених досліджень встановлено, що збільшення кількості ОЦЕ в складі неорієнтованої КНБК (за умови застосування її як стабілізаційної) обумовлює різке зростання енергетичних затрат на обертання в стовбурі похило-скерованої свердловини, особливо при встановленні трьох центраторів. Так, по відношенню до одноопорної КНБК при  $L_1 = 6 м$  встановлення другого ОЦЕ на відстані  $L_2 = 16 м$ , (табл. 1) при ( $P = const, \alpha = const$ ) призводить до збільшення енергоємності компоновки на її обертання в процесі буріння від 1.8 до 2.3 разів в діапазоні зміни зенітного кута

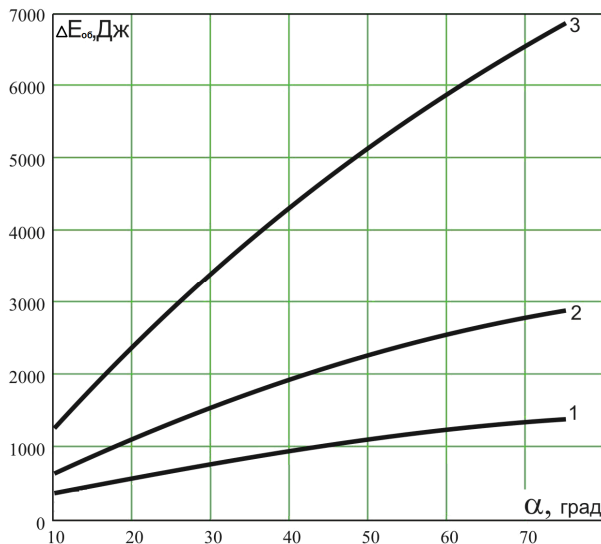
від  $10^0$  до  $70^0$ , (рис. 4). Встановлення третього ОЦЕ на відстані  $L_3 = 20 м$  (за аналогічних умов) обумовлює зростання енергетичних витрат на обертання (базової одноопорної) КНБК від 3.7 до 5.3 разів, (рис. 4). Тому, незважаючи на суттєво кращі показники стабільності управління траєкторією буріння свердловини із використанням багатоопорних КНБК [8], за величиною зниження енергопередачі до долота у процесі обертального (роторного) способу буріння, вони є неефективними.

Основними чинниками, що обумовлюють зміну величин енерговитрат під час роботи неорієнтованих КНБК (відхиляючого зусилля на долоті  $Q$  та реакцій на ОЦЕ -  $R_i$ ), є такі параметри, як:  $q$ ,  $EI$ ,  $\alpha$  і  $P$  [1, 2]. При дослідженні зміни енерговитрат неорієнтованих КНБК на їх обертання у стовбурі свердловини в умовах зростання осьового навантаження на долото, (рис. 5) (в даному випадку від 100 до 220 кН) встановлено незначне їх монотонне зменшення.

Поясненням цього є характерне зменшення реакцій на ОЦЕ внаслідок збільшення осьового навантаження на долоті та перерозподілу навантажень при деформації трубної колони в стовбурі свердловини, що доведено в дослідженнях [4]. Встановлено, що для одноопорної компоновки за даних умов ця зміна досягає близько 4 %, для двоопорної – 6 %, а для триопорної – 8 %. При встановлених даних видно, що на фрезування стінки свердловини ОЦЕ витрачається від 4 % до 10 % загальноприведеної на обертання КНБК енергії, особливо при зменшенні міцнісних характеристик ГП.

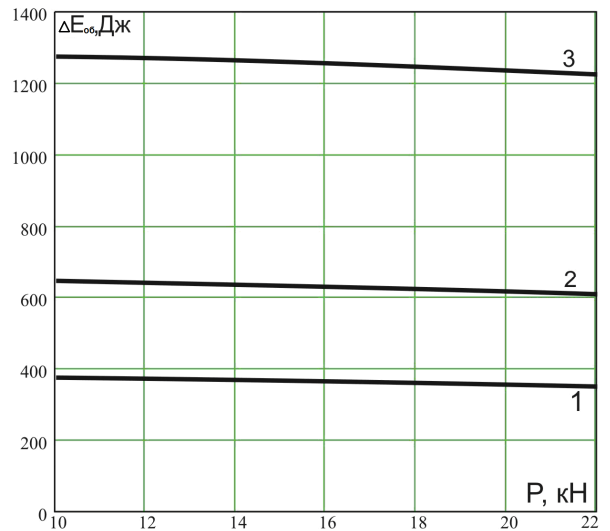
Внаслідок проявів комплексної зміни енергетичних затрат під час роботи неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини під дією зовнішніх силових і геометричних параметрів відбувається управління траєкторією буріння. Цей





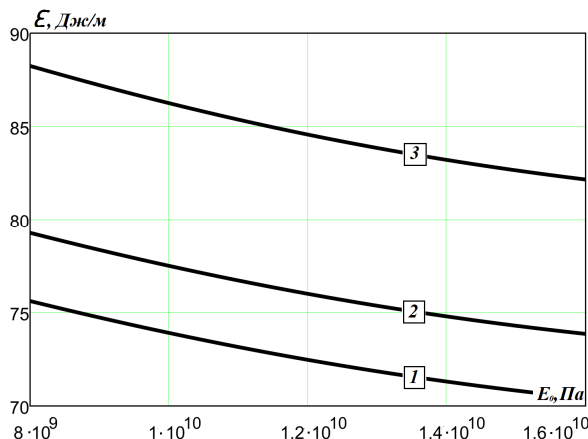
1, 2, 3 – кількість ОЦЕ в КНБК

**Рисунок 4 – Енерговитрати при обертанні неорієнтованих КНБК у прямолінійному стовбурі свердловини зі зміною при  $P = 100 \text{ кН}$   $\alpha$**



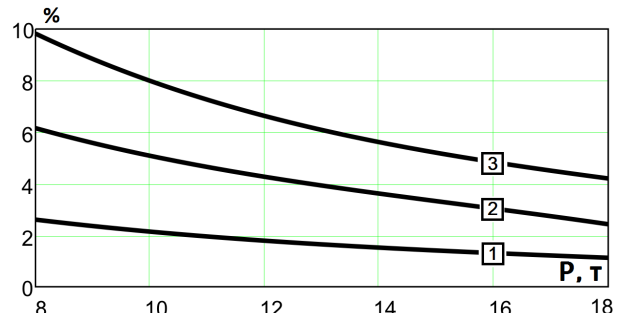
1, 2, 3 – відповідно кількість ОЦЕ в КНБК

**Рисунок 5 – Енерговитрати при обертанні неорієнтованих КНБК у прямолінійному стовбурі свердловини при  $\alpha = 10^\circ$**



1, 2, 3 – кількість ОЦЕ в КНБК

**Рисунок 6 – Питомі енергетичні витрати під час обертання неорієнтованими КНБК у стовбурі свердловини**



1, 2, 3 – кількість ОЦЕ в КНБК

**Рисунок 7 – Зниження осьового навантаження на долото за рахунок впливу осьової сили опору КНБК у стовбурі свердловини**

процес реалізується компоновками з різною кількістю ОЦЕ змінних або постійних діаметрів та місць їх встановлення по відношенню до долота. На рис. 3 зображена схема конструкцій неорієнтованих КНБК з одним, двома і трьома ОЦЕ однакового діаметрів, в яких за рахунок зміни місця розташування центраторів відхиляюче зусилля на долоті буде близьким до нуля, а компоновки можна вважати «стабілізаційними».

Використовуючи вихідні для розрахунку параметри ( $\alpha = 30^\circ$ ;  $P = 100 \text{ кН}$ , а також дані табл. 1), встановлено графічні залежності зміни питомих енерговитрат, зумовлених роботою стабілізаційних неорієнтованих КНБК із різною кількістю ОЦЕ при зміні  $E_0$ , якими складена стінка свердловини.

За характером зміни кривих питомих енерговитрат процесу обертання КНБК при збільшенні  $E_0$  при  $P = const$  впливає, що компоновка з трьома ОЦЕ є найбільш енергоємними по відношенню до одно- і двоопорних конструкцій. Різниця відповідно характеризується збільшенням параметра  $\mathcal{E}$  на 11-15 %, що відповідно понижує коефіцієнт корисної дії на долоті за рахунок зменшення осьового навантаження на долото, як зображено на рис. 7.

З отриманого впливає, що збільшення з одного до трьох ОЦЕ в складі неорієнтованої КНБК призводить до зменшення осьового навантаження на долото від 2 % до 10 %, при діючому в даний момент на долоті – 8 т. При збільшенні цієї величини до 18 т зниження параметра  $P$  для КНБК з трьома ОЦЕ відбува-

ється за рахунок перерозподілу зусиль з ОЦЕ на долото і зміною відхиляючого зусилля на ньому.

### **Висновки**

1. Узагальнено чинники енергетичних затрат під час роботи неорієнтованих КНБК і сформовано основні принципи визначення статичних форм її рівноваги в стовбурі свердловини довільної кривизни. Запропоновано математичну модель розрахунку неорієнтованих КНБК в стовбурі свердловини та розроблено методику прогнозування енергозатрат процесу їх експлуатації.

2. На основі аналізу отриманих результатів встановлено, що основними чинниками енергетичних витрат під час роботи неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини є кількість ОЦЕ в їх складі, величина zenітного кута стовбура свердловини і фізико-механічні характеристики гірської породи, яка його формує. Кількість ОЦЕ є домінуючим чинником в енергозатратності КНБК. Для оцінки величини енергетичних витрат під час роботи неорієнтованих КНБК у стовбурі свердловини запропоновано узагальнений критерій – величина питомих енергетичних затрат. З його використанням можна оцінити сукупний вплив техніко-технологічних чинників на зміну енергетичних витрат, які зумовлює робота КНБК у стовбурі свердловини, чим погіршує ККД на долоті. Шляхом імплементації даного критерію в математичні моделі неорієнтованої КНБК (при умові  $\mathcal{E} \rightarrow \min$ ) можна прийти до вибору її енергоефективної конструкції при відповідних режимно-технологічних параметрах процесу.

3. Для зменшення енергетичних витрат на обертання БК у процесі буріння похило-скерованих свердловин необхідно використовувати такі конструкції неорієнтованих КНБК, які передбачають використання найменшої кількості ОЦЕ. Основними напрямками енергоефективної оптимізації неорієнтованих КНБК для проходки прямолінійних ділянок скерованих свердловин є: використання в їх складі спеціальних засобів, які дають змогу зменшити кількість ОЦЕ і одночасно забезпечити траєкторію буріння; зменшення жорсткості на згин і ваги компоновки шляхом використання легкосплавних матеріалів та гнучких трубних елементів.

### **Література**

1 Султанов Б. Работа буровой колонны в скважине [Текст] / [Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгузин, М. Х. Шаммасов, В. Н. Сорокин]. – М.: Недра, 1973. – 217 с.

2 Янтурин Р. А. Совершенствование методов расчетов параметров компоновок низа буровой колонны и их элементов для безориентированного бурения: автореф. дис. на соиск. науч. ст. канд. технических наук: спец. 25.00.15 “Технология бурения и освоения скважин” / Р. А. Янтурин, Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2005. – 20 с.

3 Гречин Е. Г. Разработка и исследование методов проектирования и работы неориентированных компоновок низа буровой 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, 2009. – 47 с.

4 Чудик І. І. Вдосконалення методики проектування неорієнтованих компоновок низу бурової колони [Текст]: автореф. дис. на здобут. наук. ступ. канд. тех. наук: спец: 05.15.10. «Буріння свердловин» / І. І. Чудик, Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2005. – 21 с.

5 Крижанівський Є. І. Розширення технологічних можливостей та оцінювання енергоефективності роботи неорієнтованих компоновок низу бурової колони [Текст] / Є. І. Крижанівський, І. В. Воевідко, І. І. Чудик // Порозрушаючий і металообробляючий інструмент – техніка і технологія його виготовлення і застосування: Збірник наукових праць. – 2010. – Вип. 13. – С. 25-30.

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

7 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.

8 Мислюк М. А. Про один із підходів до розрахунку стабілізованих компоновок низу бурової колони. [Текст] / М. А. Мислюк, В. Д. Новіков, А. С. Овсянников та ін. // Нафтова і газова промисловість. – 1996. – № 1. – С. 17 – 19.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
27.04.17*

*Рекомендована до друку  
професором Кондратом О.Р.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Куницяком Я.В.  
(ПРАТ «НДІКБ бурового інструменту», м. Київ)*