

## РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ОРІЄНТОВАНИХ КОМПОНОВОК НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

*І.І. Чудик, А.М. Лівінський, І.Я. Білецька*

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

*Розглянуто важливе науково-практичне питання – розширення техніко-технологічних можливостей орієнтованих компоновок низу бурильної колони на базі вибійних двигунів при суміщеному способі буріння. Проаналізовано світовий досвід щодо вирішення питань проектування, вибору і експлуатації орієнтованих компоновок низу бурильної колони. Враховуючи геометричні особливості конструкції орієнтованих компоновок з відповідним кутом перекосу шпинделя вибійного двигуна, розроблено математичну модель їх розрахунку для визначення впливу техніко-технологічних параметрів на відхиляюче зусилля на долоті і кут його повороту. За результатами аналітичних досліджень на прикладі безопорних конструкцій компоновок встановлено, що врахування в аналітичній схемі кута перекосу між корпусом і шпинделем вибійного двигуна призводить до особливих умов взаємодії долота з вибоєм і стінками свердловини. Окрім того встановлено, що за рахунок кута перекосу в корпусі двигуна орієнтована безопорна компоновка низу бурильної колони має суттєві переваги в порівнянні з неорієнтованою. Доведено, що така конструктивна перевага орієнтованих компоновок низу бурильної колони дозволяє забезпечити стабілізацію зенітного кута при суміщеному способі буріння. Для розвитку науково-практичної проблеми авторами заплановано подальші дослідження.*

*Ключові слова: компоновка низу бурильної колони, проектування, відхиляюча сила, кут перекосу, кут повороту, свердловина, долото.*

*Рассмотрен важный научно-практический вопрос – расширения технико-технологических возможностей ориентированных компоновок низа бурильной колонны на базе забойных двигателей при совмещенном способе бурения. При этом проанализирован мировой опыт решения вопросов проектирования, выбора и эксплуатации ориентированных компоновок низа бурильной колонны. Учитывая геометрические особенности конструкции ориентированных компоновок с соответствующим углом перекоса шпинделя забойного двигателя, разработана математическая модель их расчета для исследования их влияния технико-технологических параметров на отклоняющее усилие на долоте и угол его поворота. По результатам аналитических исследований на примере безопорных конструкций компоновок установлено, что учет в аналитической схеме угла перекоса между корпусом и шпинделем забойного двигателя приводит к особым условиям взаимодействия долота с забоем и стенками скважины. Кроме того установлено, что за счет угла перекоса корпуса двигателя, ориентированная безопорная компоновка низа бурильной колонны имеет существенные преимущества по сравнению с неориентированной. Доведено, что такое конструктивное преимущество ориентированных компоновок низа бурильной колонны позволяет обеспечить стабилизацию зенитного угла при совмещенном способе бурения. Для развития научно-практической проблемы авторами запланировано дальнейшие исследования.*

*Ключевые слова: компоновка низа бурильной колонны, проектирование, отклоняющая сила, угол перекоса, угол поворота, скважина, долото.*

*The article considers how performance of oriented bottomhole assemblies (BHA) with downhole motors (PDM) (combined drilling) can be improved. The international practices of design, selection and application of oriented BHA are analyzed in conjunction with the subject of the article. The mathematical model was developed to calculate the static characteristics of influence, affecting steering effort at bit and turn angle, from the performance parameters. Such model was developed with consideration of geometrical specifics of the oriented assemblies with bent PDM and serves to define the influence of design parameters of oriented BHA and bottomhole parameters on the static characteristics of their interaction with well walls and down hole. Results of analytic studies for designs of unsupported assemblies show that inclusion of bend angle between housing and bearing assembly of the PDM into calculation leads to special interaction between bit and well walls and down hole. It is also established that the presence of bend angle creates significant advantage for the oriented unsupported BHA in comparison with non-oriented assembly. Such design advantage allows stabilize inclination angle in combined drilling. The further research is planned to expand on the findings.*

*Key words: bottomhole assembly, well planning, side force, azimuth angle, turn angle, well, bit.*

**Вступ.** Збільшення обсягів видобутку нафти і газу вимагає підвищення кількісних і якісних показників буріння свердловин та зменшення витрат на розробку родовищ. Сьогодні цю проблему вирішують шляхом спорудження скерованих свердловин. Останнім часом у практиці їх буріння часто застосовують суміщений спосіб, при якому крутий момент для долота генерується вибійним двигуном та підсилюється верхнім приводним механізмом

(верхнім приводом чи ротором), що також передає до вибою частину механічної енергії по бурильній колоні (БК).

Для дотримання параметрів проектного профілю цих свердловин використовують спеціальні засоби, для проектування і вибору яких є необхідним використання відповідних науково-методичних основ. До технічних засобів, які використовуються при бурінні в заданому напрямі, відносяться компоновки низу бурильної

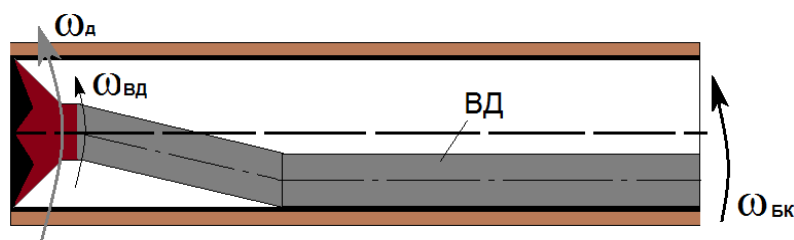


Рисунок 1 – Схема орієнтованої КНБК при суміщеному способі буріння

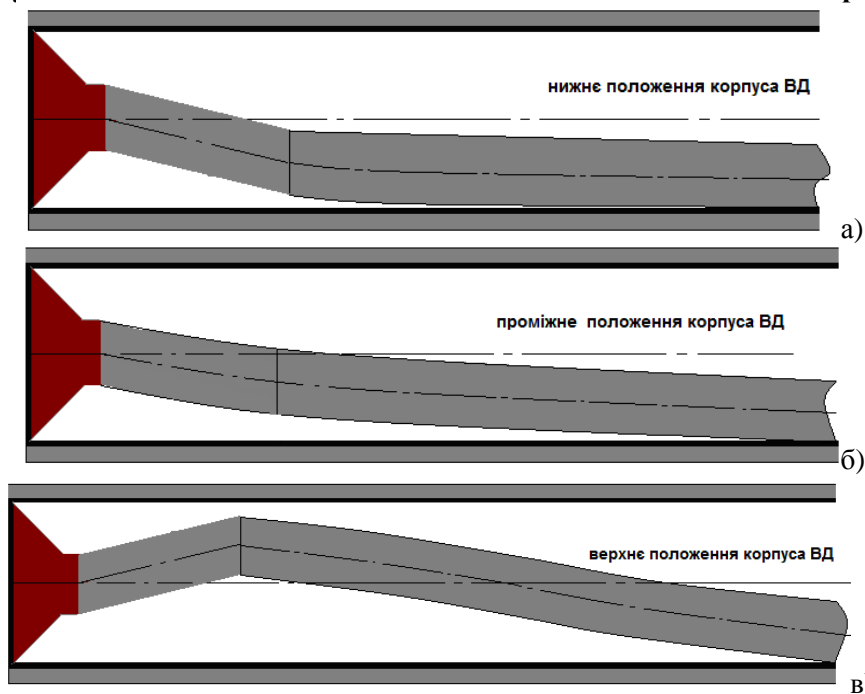


Рисунок 2 – Крайові положення розташування орієнтованої КНБК при суміщеному способі буріння

колони (КНБК), які є орієнтованими та неорієнтованими. До складу неорієнтованих КНБК входять опорно-центруючі елементи (ОЦЕ), розташовані в певних місцях для центрування бурильної колони у свердловині. Орієнтовані ж КНБК включають елементи примусово-орієнтованого викривлення (криві перевідники, відхиляючі пристрої та ін.), які дозволяють проходити ділянки свердловини певної кривизни в заданому напрямі при бурінні з використанням вибійних двигунів. Як показала практика будівництва скерованих свердловин (№ 253, 266, 276, 258 Гнідинцівського родовища та № 535 на Бугруватівському родовищі) [1-4 та ін.], орієнтовані КНБК на базі вибійного двигуна можуть ефективно використовуватися і при суміщеному способі буріння в інтервалах із великими зенітними кутами викривлення.

Незважаючи на те, що дослідженнями умов і особливостей роботи КНБК різного призначення займалися багато вітчизняних і закордонних вчених, аналіз опублікованих праць [1-6 та ін.] у даному напрямі доводить, що питання використання орієнтованих компоновок низу бурильної колони при суміщеному способі буріння є актуальним і потребує розвитку. Це і визначає мету даної роботи, яка полягає в оцінці можливостей використання орієнтованих КНБК при суміщеному способі буріння сверд-

ловин. При цьому об'єктом дослідження є орієнтована КНБК на базі вибійного двигуна, а предметом дослідження – статичні характеристики взаємодії її елементів із вибоєм та стінками свердловини.

Для реалізації поставленої мети авторами статті сформовано такі задачі дослідження:

1. Визначення особливостей взаємодії орієнтованих безпорних КНБК у стовбурі скерованої свердловини при суміщеному способі буріння.

2. Розроблення математичної моделі орієнтованої безпорної КНБК у прямолінійному стовбурі скерованої свердловини.

3. Встановлення та оцінка статичних характеристик взаємодії елементів орієнтованої безпорної КНБК зі стінками прямолінійного стовбура скерованої свердловини.

Використання орієнтованих КНБК при суміщеному способі буріння (за наявності кута перекосу в нижній частині ВД) схематично можна описати у відповідності до рис. 1.

Внаслідок обертання БК із кутовою швидкістю  $\omega_{БК}$ , корпус ВД (і компоновка загалом) обертається навколо осі свердловини, що зумовлює появу певних крайових положень, для яких будуть характерними випадки, зображені на рис. 2., а), б), в).

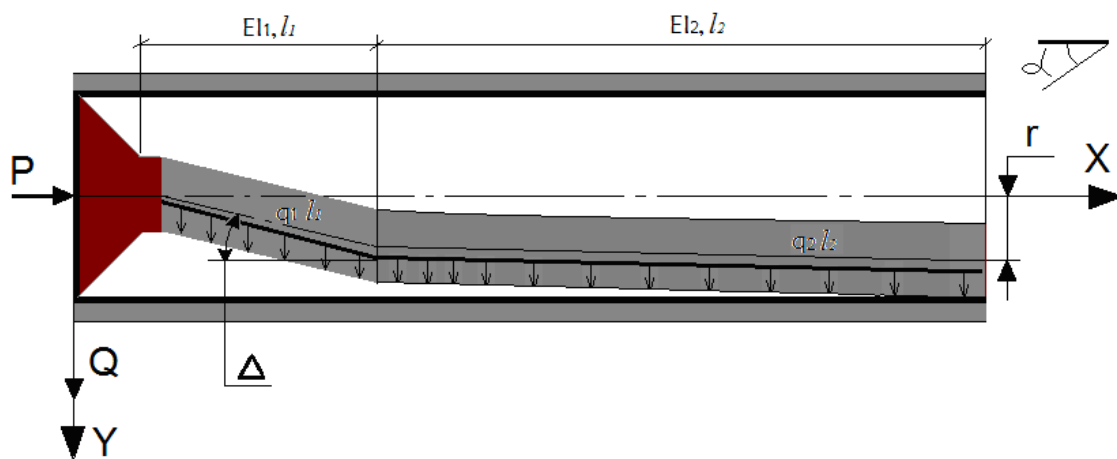


Рисунок 3 – Розрахункова схема орієнтованої КНБК із нижнім положенням корпусу вибійного двигуна

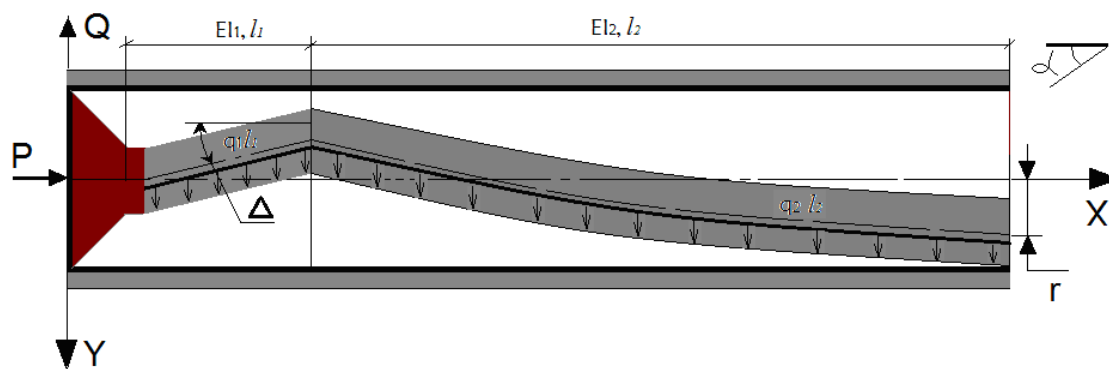


Рисунок 4 – Розрахункова схема орієнтованої КНБК із верхнім положенням корпусу вибійного двигуна

Із наведених схем можна припустити, що при таких положеннях наддолотної частини БК суттєво змінюються чинники викривлення стовбура свердловини (кут повороту долота і відхиляюче зусилля на ньому). Слід зазначити, що класичні за конструкціями безопорні та опорні КНБК у скерованих свердловинах характеризуються обертанням навколо власної осі, що обумовлює при обертанні БК стабільність параметрів їх викривлення, до яких відносяться відхиляюче зусилля на долоті  $Q$  та кут його повороту відносно осі свердловини  $\delta$ . З використанням класичних методик [1, 2, 4] можна спрогнозувати траєкторію буріння свердловини або її забезпечувати, використовуючи відповідні конструкції неорієнтованої КНБК. Проте, основною проблемою є те, що класичні методики не дозволяють розраховувати і проектувати орієнтовані компоновки, зокрема при їх обертанні під час суміщеного способу буріння.

Це обумовлює необхідність створення відповідної методики для врахування конструктивних і технологічних аспектів проблеми обертання орієнтованих КНБК із кутом перекосу вала вибійного двигуна.

Розглянемо орієнтовані КНБК із верхнім і нижнім положенням корпусу вибійного двигуна, які розташовані в прямолинійному стовбурі скерованої свердловини. На рис. 3 і 4 зображені прийняті для дослідження розрахункові схеми

їх конструкцій, які складаються із двох ділянок певної ваги погонного метра та жорсткості на згин. Перша від долота ділянка – це шпindel вибійного двигуна, друга – його корпус. Окрім того, вважається, що:

- стінки свердловини не деформуються і є прямолинійними;
- центр долота і стовбура свердловини знаходяться в одній точці;
- відцентрові сили відсутні за рахунок невеликих швидкостей обертання;
- згин БК відбувається в одній площині (плоский);
- у місцях контактування КНБК зі стінкою свердловини відсутні сили тертя.

Згідно з рис. 3 і 4  $l_i$  – довжини ділянок КНБК;  $q_i, EI_i$  – вага погонного метра і жорсткість на згин ділянок КНБК;  $Q, P$  – відхиляюча сила і осьове навантаження на долоті;  $\alpha$  – зенітний кут;  $\Delta$  – кут перекосу на ВД;  $r$  – радіальний зазор між віссю корпусу ВД і стінкою свердловини в верхній точці їх контактування зі стовбуром свердловини:

$$r = \frac{D_D - D_{ВД}}{2}, \quad (1)$$

де  $D_D$  – діаметр долота;

$D_{ВД}$  – діаметр корпусу ВД.

Для вирішення даної задачі пропонується застосувати метод диференціальних рівнянь пружинності.

жної осі КНБК при відповідних граничних умовах [1-6 та ін.]. Для наведених розрахункових схем (рис. 3 і 4) характерні такі диференціальні рівняння:

• для ділянки КНБК довжиною  $l_1$ :

$$EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = -P y_1(x_1) + Q x_1 + \frac{q_1 x_1^2 \sin(\alpha)}{2}; \quad (2)$$

• для ділянки КНБК довжиною  $l_2$ :

$$EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = -[P - q_1 l_1 \cos(\alpha)] y_2(x_2) + Q(l_1 + x_2) + \left( \frac{q_1 l_1^2}{2} + q_1 l_1 x_2 + \frac{q_2 x_2^2}{2} \right) \sin(\alpha). \quad (3)$$

Після подвійного інтегрування вище наведених диференціальних рівнянь отримуємо функції прогинів осі КНБК відносно осі свердловини:

$$y_1(x) = A_1 \sin(k_1 x_1) + A_2 \cos(k_1 x_1) + \frac{Q x_1}{P} + \left[ \frac{q_1 x_1^2}{2P} - \frac{q_1}{k_1^2 P} \right] \sin(\alpha); \quad (4)$$

$$y_2(x) = B_1 \sin(k_2 x_2) + B_2 \cos(k_2 x_2) + \frac{Q(x_2 + l_1)}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)} + \frac{\frac{q_2 x_2^2}{2} + \frac{q_1 l_1^2}{2} + q_1 l_1 x_2 - \frac{q_2}{k_2^2}}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)} \sin(\alpha). \quad (5)$$

Функції кутів повороту осі компоновки відносно осі свердловини описуються відповідно для кожної з ділянок орієнтованих КНБК так:

$$y_1'(x_1) = A_1 k_1 \cos(k_1 x_1) - A_2 k_1 \sin(k_1 x_1) + \frac{Q}{P} + \frac{q_1 x_1}{P} \sin(\alpha); \quad (6)$$

$$y_2'(x_2) = B_1 k_2 \cos(k_2 x_2) - B_2 k_2 \sin(k_2 x_2) + \frac{Q + (q_1 l_1 + q_2 x_2) \sin(\alpha)}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)}. \quad (7)$$

Функції згинаючих моментів осі КНБК відносно осі свердловини відповідно описуються:

$$M_1(x_1) = \left[ -A_1 k_1^2 \sin(k_1 x_1) - A_2 k_1^2 \cos(k_1 x_1) + \frac{q_1}{P} \sin(\alpha) \right] EI_1; \quad (8)$$

$$M_2(x_2) = \left[ -B_1 k_2^2 \sin(k_2 x_2) - B_2 k_2^2 \cos(k_2 x_2) + \frac{q_2 \sin(\alpha)}{P - q_1 l_1 \cos(\alpha)} \right] EI_2, \quad (9)$$

де  $A_i, B_i$  – сталі інтегрування;

$k_i$  – розрахунковий коефіцієнт [1-6 та ін.]:

$$k_i = \sqrt{\frac{P - q_{i-1} l_{i-1} \cos(\alpha)}{EI_i}}. \quad (10)$$

Взаємодія орієнтованих КНБК зі стінками свердловини характеризується такими граничними умовами:

$$\left. \begin{aligned} y_1(0) &= 0 \\ y_1'(l_1) - y_2'(0) &= \pm \Delta \\ y_1(l_1) &= y_2(0) \\ y_2'(l_2) &= 0 \\ y_2(l_2) &= r \\ y_2''(l_2) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Примітка:

«+» - орієнтовна КНБК із нижнім положенням корпусу вибійного двигуна (рис. 3);

«-» - орієнтовна КНБК із верхнім положенням корпусу вибійного двигуна (рис. 4).

За результатами розрахунку системи рівнянь, складеної з залежностей (1)-(10) відповідно до граничних умов (11), отримуємо значення невідомих величин, основними з яких є:  $Q, l_2$  та постійні інтегрування  $A_i, B_i$ .

Для встановлення технологічних можливостей орієнтованих безопорних КНБК (діапазони зміни кута повороту долота, відхиляючого зусилля на ньому) при роботі в скерованій свердловині проведено розрахунки статичних характеристик їх взаємодії з її стінками з врахуванням відповідних до рис. 5 конструктивних і режимно-технологічних параметрів.

За результатами аналітичних досліджень отримано графічні залежності зміни відхиляючого зусилля на долоті  $Q(P)$  та кута повороту долота  $\delta(P)$  для розрахункових схем компоновок, які наведені на рис. 4.

Аналізуючи отримані результати, стає очевидним, що за рахунок кута перекосу  $\delta$  при обертанні орієнтованих безопорних КНБК навколо осі свердловини відбувається зміна радіального зазору в місці перекосу частин корпусу ВД. Це призводить до відповідної зміни довжини  $l_2$  верхнього (більшого) плеча КНБК, що впливатиме на відхиляюче зусилля на долоті  $Q$  і кут його повороту  $\delta$ , як зображено на прикладі рис. 10: при  $\Delta = 0.9^\circ$ ;  $\alpha = 70^\circ$ . Окрім цього, слід відмітити, що при зміні положення корпусу ВД (з нижнього на верхнє) по відношенню до осі свердловини відбувається перехід  $\delta$  через «нульове значення» є важливим для стабілізації зенітного кута свердловини. Дана особливість, характерна для орієнтованої КНБК при суміщеному способі буріння, має явну відмінність від звичайних неорієнтованих компоновок для роторного способу буріння.

Слід зауважити: зі зміною величини осьового навантаження на долоті із зазначеного інтервалу 5-13 т, кут повороту долота  $\delta$  зменшується монотонно, що дозволяє отримати досить стійку роботу компоновки при умовах заклинювання компоновки в стовбурі свердловини, її демпфуванні тощо.

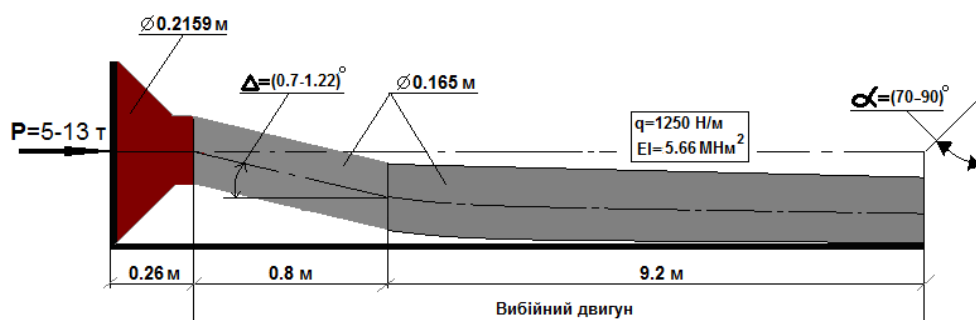
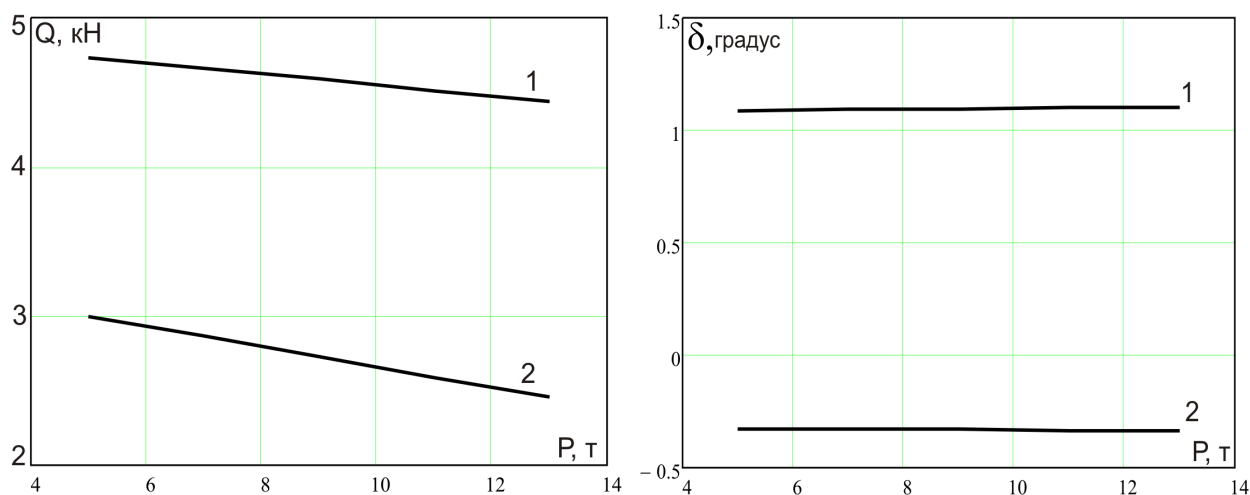


Рисунок 5 – Розрахункові параметри безопорної орієнтованої КНБК



1 - КНБК з верхнім положенням корпусу ВД; 2 – КНБК з нижнім положенням корпусу ВД

Рисунок 6 – Статичні характеристики взаємодії безопорної орієнтованої КНБК із вибоєм та стінками свердловини при зміні  $P$  ( $\Delta = 0.9^0$ ;  $\alpha = 70^0$ )

Для визначення впливу зміни кута перекосу  $\Delta$  на корпусі ВД на  $Q$  та кут його повороту  $\delta$  наведено відповідні графічні залежності (рис. 7) для двох крайніх випадків.

З отриманих графічних залежностей (рис. 7) випливає, що при збільшенні кута перекосу  $\Delta$  на корпусі ВД в безопорній орієнтованій КНБК, спостерігається різке підвищення показників  $Q(\Delta)$  і  $\delta(\Delta)$ , ніж було відображено для  $Q(P)$  і  $\delta(P)$  (рис. 7). Якщо зіставити дані статичних характеристик  $Q$  і  $\delta$  для  $\Delta = 0^0$  (характерними для класичної безопорної компоновки, де  $Q = 4114 \text{ Н}$  і  $\delta = 0.404^0$ ) із відповідними величинами (рис. 7), побачимо, що вплив кута перекосу корпусу ВД є дуже характерним.

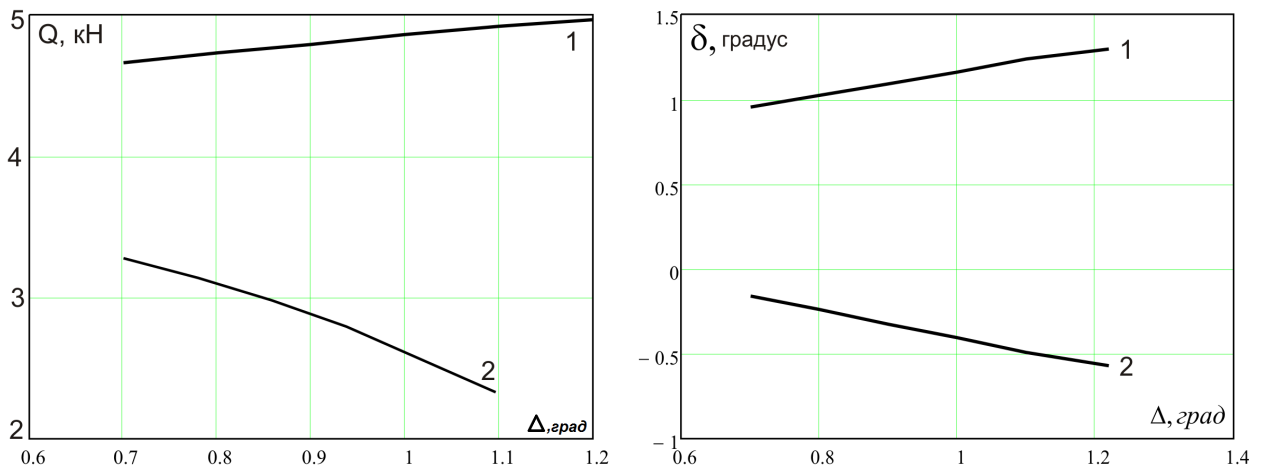
Для інтерпретації динаміки зміни  $Q$  і  $\delta$  за один її оберт навколо осі свердловини орієнтованої безопорної КНБК пропонуються відповідні графічні залежності (рис. 8), відображені в полярних координатах.

У обидвох випадках  $Q(\Delta)$  і  $\delta(\Delta)$  характерною особливістю є певна симетрія в динаміці змін їх значень. Окрім того, за результатами зміни  $\delta(\Delta)$  за один оберт відмічається його подвійний перехід через «нуль», що є характерною умовою стабілізації зенітного кута свердловини. Дана умова є характерною для безопорної КНБК тільки за наявності в її наддолотній

частині кута перекосу  $\Delta$  (рис. 5). Для безопорних орієнтованих компоновок даний параметр, залежно від величини зенітного кута  $\alpha$ , або більший або менший від нуля. Оскільки інтенсифікація викривлення стовбура свердловини під час її буріння більшою мірою залежить від кута повороту долота, ніж від відхиляючого зусилля на долоті [2, 3], отримання відповідних показників за  $\delta$  дає можливість використовувати безопорні КНБК (рис. 5) при суміщеному способі буріння як стабілізаційні, що було доведено при бурінні свердловин Гнідинцівського родовища № 253, 266, 276, 258 та № 277 та Бугруватівського родовища № 535.

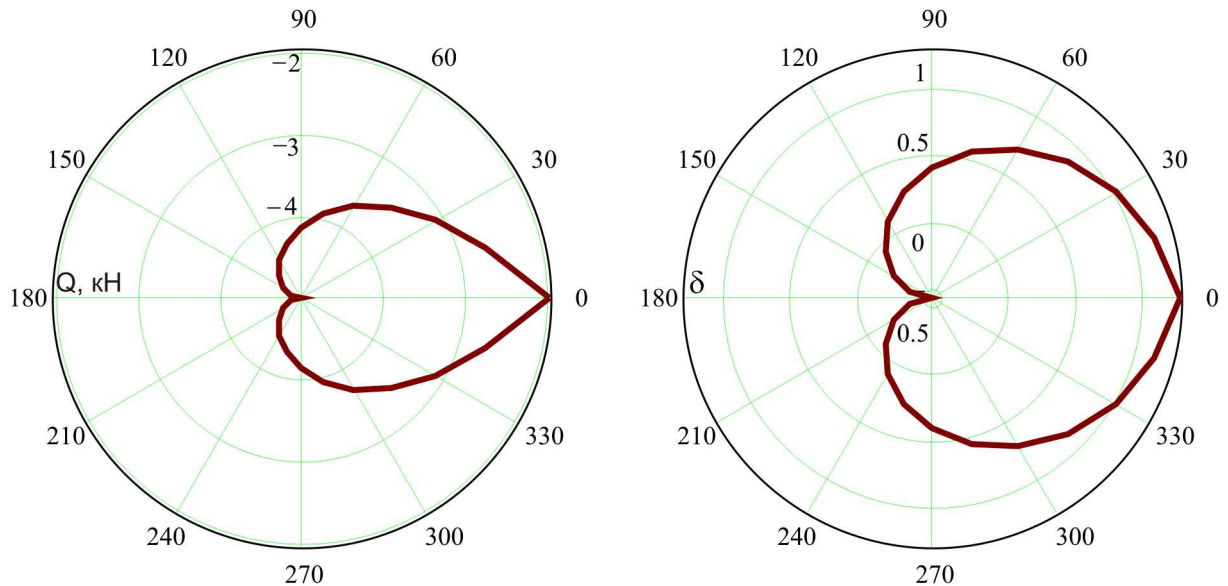
### Висновки

1. Для забезпечення проектних параметрів стовбура скерованої свердловини під час буріння суміщеним способом запропоновано використання орієнтованої КНБК на базі ВД з кутом перекосу шпинделя від  $0.77^0$  до  $1.22^0$ . При цьому розглянуто можливість використання КНБК такого типу в безопорному варіанті. Для визначення статичних характеристик взаємодії елементів їх орієнтованих безопорних конструкцій із вибоєм і стінками скерованої свердловини побудовано їх відповідні математичні моделі та розроблено методику розрахунку, яка реалізується методом диференціальних рівнянь



1 - КНБК із верхнім положенням корпусу ВД; 2 - КНБК із нижнім положенням корпусу ВД

**Рисунок 7 – Статичні характеристики взаємодії безопорної орієнтованої КНБК із вибоєм та стінками свердловини при зміні  $\Delta$  ( $P = 8$  т;  $\alpha = 80^\circ$ )**



**Рисунок 8 – Статичні характеристики взаємодії безопорної орієнтованої КНБК із вибоєм та стінками свердловини за один її оберт ( $P = 8$  т;  $\alpha = 80^\circ$ )**

пружної осі. При цьому враховуються крайові варіанти розташування конструкції багатоеlementної компоновки в стовбурі свердловини (верхнє і нижнє положення), їх погонна вага та жорсткість на згин, кут перекосу корпусу ВД відповідного діаметру зі стінками свердловини. Розрахунок КНБК при цьому здійснюється за допомогою пакету програм у середовищі *MathCad Profeschenal*.

2. За результатами аналітичних досліджень статичних характеристик взаємодії безопорної орієнтованої КНБК при суміщеному способі буріння конкретизованими конструктивними і режимно-технологічними параметрами встановлено, що:

при обертанні орієнтованих безопорних КНБК навколо осі свердловини відбуваються зміни радіального зазору в місці перекосу корпусу ВД, довжини  $l_2$  верхнього (більшого)

плеча КНБК, відхиляючого зусилля на долоті  $Q$  і кута його повороту  $\delta$ ;

при зміні положення корпусу ВД по відношенню до осі свердловини (з нижнього на верхній) при  $\{-0.572^\circ < \delta < 1.24^\circ\}$  відбувається перехід  $\delta$  через «нуль», що має велике значення для стабілізації зенітного викривлення стовбура свердловини і явну відмінність від звичайних опорних компонок.

3. Промислова апробація безопорних стабілізаційних орієнтованих КНБК була проведена в свердловинах (на Гнідинцівському родовищі – № 253, 266, 276, 258 та № 277; на Бугруватівському родовищі – № 535), де було отримано необхідну траєкторію при заданих режимно-технологічних параметрах.

**Література**

- 1 Гречин Е. Г. Разработка и исследование методов проектирования и работы неориентируемых компоновок низа бурительной 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 бурительной колонны [Текст] / В. Г. Григулецкий, В. Т. Лукьянов. – М.: Недра, 1990. – 304 с.
- 3 Чудик І. І. Вплив кривизни стовбура свердловини на статичні форми рівноваги неорієнтованих КНБК / І. І. Чудик, А. А. Козлов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2006. – № 1(13). – С. 50-54.
- 4 Калинин А.Г. Бурение наклонных и горизонтальных скважин. / [А. Г. Калинин, Б. А. Никитин, К. М. Солодкий, Б. З. Султанов]. – М.: Недра, 1997. – 651 с.
- 5 Султанов Б. З. Работа бурительной колонны в скважине / Б. З. Султанов, Е. И. Ишемгузин, М. Х. Шаммасов, В. Н. Сорокин. – М.: Недра, 1973. – 217 с.
- 6 Івасів В. М. Розрахунок компоновок низу бурильної колони (КНБК) з двома центраторами / [В. М. Івасів, І. І. Чудик, А. В. Козлов, В. Г. Глушич] // Науковий вісник ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ. – 2002. – № 2(3). – С. 15 – 16.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
25.10.17*

*Рекомендована до друку  
професором **Кондратом О.Р.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук **Куцяком Я.В.**  
(НД і КБ бурового інструменту, м. Київ)*