

DOI 10.26886/2414-634X.8(17)2017.7

UDC 622.243.273

**THE EFFECT OF THE ANISOTROPY DRILLING INDEX ON THE
DEVIATION OF THE WELL AXIS FROM THE DESIGN PROFILE**

**PhD in Technical Sciences, Y. M. Kochkodan, A. I. Vasko,
R. L. Dobrutsky**

Ivano-Frankivsk National Technical University of oil and gas, Ukraine,
Ivano-Frankivsk

Analytical studies of the interaction of the load on the bottom and the bottom hole assembly of the drill string with the bottom itself and the wall of the well during drilling tilted formations have been carried out. The correlation interrelation among the drilling index of anisotropy, zenith angle, the slope of the seams, geometric characteristics of the well, the bottom hole assembly of the drill string and the axial load on the bit has been proved.

Analytical studies of the impact of bottom hole assembly of the drill string containing a centralizer on the bottom itself and the borehole wall have been performed. It has been found that with an increase in the axial load on the bit and the gap between the loaded drill pipes and the borehole wall from the bit to the point of contact, the column with the borehole wall distance decreases, and the centralizer in the bottomhole assembly of the drill string increases this distance, thus increasing bit load without the risk of the zenith angle deviation.

Keywords: borehole wall, zenith angle, drill string, bit load, bottom hole assembly of the drill string, centralizer, dispersion index anisotropy, reservoir angle.

кандидат технічних наук, доцент, Кочкодан Я. М., Васько А. І., Добруцький Р. Л. Вплив бурового індексу анізотропії на відхилення осі

свердловини від проектного профілю/ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна, Івано-Франківськ

Проведено аналітичні дослідження взаємодії навантаження на вибій та компоновки низу бурильної колони з вибоєм та стінкою свердловини при бурінні у похило залеглих пластах. Показано взаємозв'язок між буровим індексом анізотропії, зенітним кутом, кутом нахилу пластів, геометричними характеристиками свердловини, компоновкою низу бурильної колони та осьовим навантаженням на долото.

Аналітично досліджено вплив нижньої частини бурильної колони з вибоєм та стінкою свердловини при наявності центратора. Встановлено, що зі збільшенням осьового навантаження на долото та зазору між обважненими бурильними трубами і стінкою свердловини відстань від долота до точки дотику колони зі стінкою свердловини зменшується, а наявність в компоновці низу бурильної колони центратора збільшує цю відстань, що дозволяє збільшити навантаження на долото без небезпеки росту зенітного кута.

Ключові слова: стінка свердловини, зенітний кут, бурильна колона, навантаження на долото, компоновка низу бурильної колони, центратор, буровий індекс анізотропії, кут нахилу пласта.

Вступ. У процесі буріння будь-яким способом у тій чи іншій мірі має місце довільне викривлення ствола свердловини. Під час буріння ізотропних порід горизонтальних та похилозалеглих пластів можливість викривлення свердловини значно менша, ніж у анізотропних породах круто падаючих пластів. За сприятливих геологічних умов можливо пробурити умовно вертикальну свердловину при дотриманні елементарних технологічних вимог. За несприятливих геологічних умов

потрібно розробляти та впроваджувати техніко-технологічні заходи для запобігання викривлення свердловин. Розробка цих заходів неможлива без виявлення причин, які спричиняють викривлення свердловин.

Геологічні причини викривлення свердловин полягають у тому, що при бурінні у пластах, які відрізняються фізико-механічними властивостями порід, їх будовою та характеристиками залягання швидкість руйнування в окремих точках вибою різна. Основною геологічною причиною, яка зумовлює викривлення свердловини є анізотропія гірських порід, яка характеризується різницею швидкостей руйнування порід у різних напрямках як на вибої, так і у привибійних бокових стінках ствола свердловини [1, с.41-43, с.46-53; 2 с.73-83; 3 с.11; 4 с.12-19; 5 с.22-23, с.26-29]. Основними причинами анізотропії за буримістю є часте чергування порід різної твердості, шаруватості та сланцюватість відкладів, які практично пов'язані з частим чергуванням прошарків різної міцності та твердості. Найбільшу анізотропію мають породи з текстурою, яка характеризується паралельними площинами, мінерали яких мають голчасту, пластинчасту або лускоподібну форму. У гірських породах з вираженою шаруватістю площини напластування відіграють роль шарів послаблення, вздовж яких деформаційні та міцнісні властивості понижені, порівняно з іншими напрямками. З умови руйнування важливе те, що по горизонтальних поверхнях послаблення буде в першу чергу руйнуватись порода [6, с.52-54].

Метою роботи є аналітичне дослідження впливу навантаження на вибій та сили взаємодії бурильної колони зі стінкою свердловини при бурінні в анізотропних породах при застосуванні різних компоновок низу бурильної колони.

Основна частина. Розглянемо нижню частину бурильної колони, яка знаходиться у похилому стволі свердловини із зенітним кутом α (рис. 1).

За відсутності осьового навантаження на вибій єдиною діючою на нього силою буде складова власної ваги частини колони, яка розташована між долотом та нижньою точкою дотику. Ця сила є випрямляючою і прагне направити свердловину до вертикалі. Якщо створити осьове навантаження на вибій, то на цю ділянку буде діяти і інша сила, яка прагне відхилити свердловину від вертикалі. Результуюча цих двох сил може бути розкладена на дві складові – вздовж осі свердловини і перпендикулярно до неї. Нормальна складова може або збільшувати кут викривлення, або зменшувати або стабілізувати його.

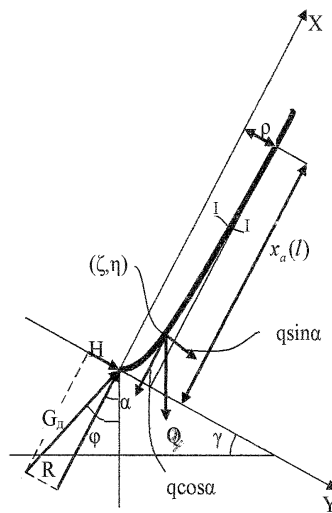


Рис. 1. Схема взаємодії нижньої частини бурильної колони з вибоєм та стінкою свердловини

З рисунка виходить:

$$\frac{H}{G_0} = \operatorname{tg}(\varphi - \alpha), \quad (1)$$

де α - зенітний кут осі свердловини;

φ - кут між вертикаллю і рівнодійною сил, що діють на долото.

Для знаходження складових реакції вибою на долото розглянемо рівновагу моментів, що діють на виділену ділянку бурильної колони.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -G_0 \cdot y + H \cdot x + \int_0^x [q \cdot \cos \alpha (y - \eta) + q \cdot \sin \alpha (x - \xi)] d\xi, \quad (2)$$

де $EI \frac{d^2 y}{dx^2}$ - момент внутрішніх сил.

Дане рівняння є інтегрально - диференціальним рівнянням осі бурильної колони.

Оскільки у межах інтегрування $(0;x)$ величини x та y є постійні, то розкриємо ці інтеграли:

$$\left. \begin{aligned} q \sin \alpha \int_0^x (x - \xi) d\xi &= q \sin \alpha \left[x^2 - \frac{x^2}{2} \right] = q \sin \alpha \frac{x^2}{2} \\ q \cos \alpha \int_0^x (y - \eta) d\xi &= q \cos \alpha \left[xy - \int_0^x \eta d\xi \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Підставивши (2) в (3), отримаємо:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -G_0 \cdot y + H \cdot x + q \cos \alpha \cdot xy - q \cos \alpha \int_0^x \eta d\xi + q \sin \alpha \frac{x^2}{2}, \quad (4)$$

Продиференціюємо рівняння (4) по x :

$$EI \frac{d^3 y}{dx^3} = -G_0 \frac{dy}{dx} + q \cos \alpha \cdot x \frac{dy}{dx} + q \sin \alpha \cdot x + H, \quad (5)$$

Приведемо рівняння (5) до безрозмірного вигляду, поділивши обидві його частини на узагальнений параметр - $m q \sin \alpha$, де m - умовна (лінійна) величина.

Отже:

$$\frac{EI}{m q \sin \alpha} \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{G_0}{m q \sin \alpha} \frac{dy}{dx} + \frac{x}{m t g \alpha} \frac{dy}{dx} + \frac{x}{m} + \frac{H}{m q \sin \alpha}, \quad (6)$$

Введемо нові змінні між розмірними і безрозмірними величинами:

$$\frac{x}{m} = X, \quad (7)$$

$$dx = m dX, \quad (8)$$

$$y = m U t g \alpha, \quad (9)$$

$$\frac{dy}{dx} = t g \alpha \cdot \frac{dU}{dX}, \quad (10)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{m} \cdot \frac{d^2 U}{d^2 X}, \quad (11)$$

$$\frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{m^2} \cdot \frac{d^3 U}{dX^2}, \quad (12)$$

$$\frac{G_d}{mq \cos \alpha} = X_2, \quad (13)$$

$$\frac{H}{mq \sin \alpha} = h, \quad (14)$$

$$\rho = \frac{r}{m \operatorname{tg} \alpha}; \quad r = \frac{D_c - d_3}{2}, \quad (15)$$

Підставивши (7) – (15) у (6), отримаємо:

$$\frac{EI}{m^3 q \cos \alpha} \frac{d^3 U}{dX^3} = -(X_2 - X) \frac{dU}{dX} + X + h, \quad (16)$$

Допустимо, що

$$\frac{EI}{m^3 \cdot q \cdot \cos \alpha} = 1, \quad (17)$$

тоді:

$$m = \sqrt[3]{\frac{EI}{q \cdot \cos \alpha}}, \quad (18)$$

Підставивши (17) у (16), отримаємо:

$$\frac{d^3 U}{dX^3} = -(X_2 - X) \frac{dU}{dX} + X + h, \quad (19)$$

Точного розв'язку даного рівняння не існує, а тому розв'яжемо його одним із наближених методів. Для розв'язку даного рівняння скористаємося методом апроксимації, згідно з яким дійсна функція U описується наближеною U_a за умови, що в кінцевих точках значення дійсної та наближеної функції рівні.

Використаємо, як апроксимуючу функцію:

$$U_a = \rho \cdot \sin \frac{\pi x}{2X_a}, \quad (20)$$

Тричі проінтегрувавши рівняння (19), та підставивши замість функції U функцію U_a отримаємо:

$$\frac{d^2U}{dX^2} = -(X_2 - X) \cdot U_a - \int_0^x U_a dX + \frac{X^2}{2} + hX + k, \quad (21)$$

$$\frac{dU}{dX} = -(X_2 - X) \cdot \int_0^x U_a dx - 2 \int_0^x \int_0^x U_a dXdX + \frac{X^3}{6} + h \frac{X^2}{2} + kX + L, \quad (22)$$

$$U = -(X_2 - X) \cdot \int_0^x \int_0^x U_a dx dx - 3 \int_0^x \int_0^x \int_0^x U_a dXdXdX + \frac{X^4}{24} + h \frac{X^3}{6} + k \frac{X^2}{2} + LX + M, \quad (23)$$

Таким чином, розв'язок рівнянь дає 7 невідомих (три постійні інтегрування k, L, M , постійну h , навантаження на долото X_2 , зазор ρ , відстань від долота до точки дотику із стінкою свердловини X_a).

Граничні умови:

При $x = 0$:

$$U = 0, \quad (24)$$

$$\frac{d^2U}{dX^2} = 0, \quad (25)$$

При $x = x_a$

$$U = \rho, \quad (26)$$

$$\frac{dU}{dX} = 0, \quad (27)$$

$$\frac{d^2U}{dX^2} = 0, \quad (28)$$

Використовуючи граничні умови та вважаючи X_2 та ρ відомими, визначимо решту п'ять невідомих (k, L, M, h, X_a). Тоді:

$$K = 0$$

$$M = 0$$

$$L = 2\rho \frac{X_a}{\pi} \left(X_2 + X_a - 4 \frac{X_a}{\pi} \right) - \frac{X_a^3}{6} - h \frac{X_a^2}{2}, \quad (29)$$

$$h = \rho \left(\frac{X_2}{X_a} - 1 + \frac{2}{\pi} \right) - \frac{X_a}{2}, \quad (30)$$

$$X_a = 8 \frac{\rho}{X_a} \left(\frac{3}{X_a^2} - A \cdot X_2 + B \cdot X_a \right), \quad (31)$$

де А і В сталі величини:

$$A = \frac{12}{\pi^2} - 1, \quad (32)$$

$$B = \frac{36}{\pi^2} \left(1 - \frac{2}{\pi} - \frac{\pi}{36} - \frac{\pi^2}{36} \right), \quad (33)$$

Рівняння (31) є трансцендентним і його розв'язок здійснюють методом ітерації.

Величину X_a визначимо за наближеною ітераційною формулою:

$$X_a = X_{an} + \frac{f(X_{an}) - X_{an}}{1 - f'(X_{an})}, \quad (34)$$

Таким чином:

$$X_a = X_{an} + \frac{8 \frac{\rho}{X_a} \left(\frac{3}{X_a^2} - A \cdot X_2 + B \cdot X_a \right) - X_{ay}}{1 + 8\rho \left(\frac{9}{X_{an}^4} - A \cdot \frac{X_2}{X_{an}} \right)}, \quad (35)$$

За допомогою програми MathCAD отримали графічні залежності відстані від долота до точки дотику колони зі стінкою свердловини x_a та нормальної складової h від навантаження X_2 та зазору ρ (рис. 2,3).

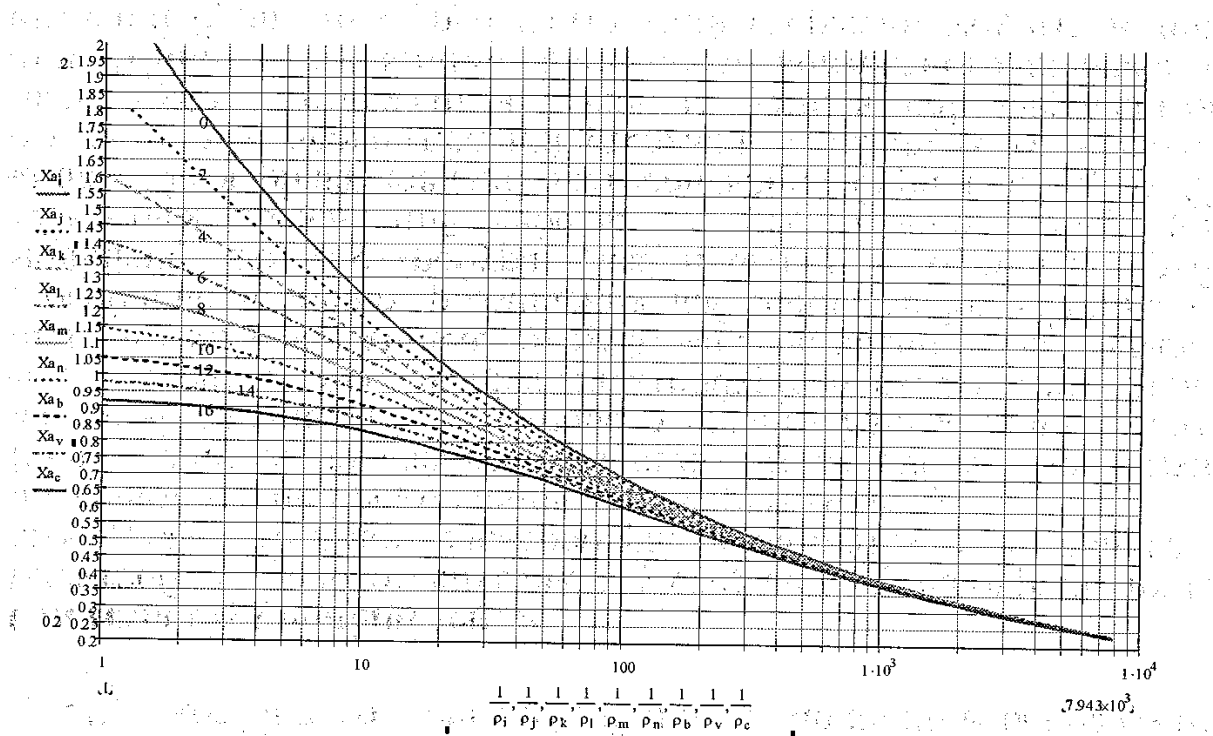


Рис. 2. Графічне зображення функції $x_a=f(\rho, x_2)$

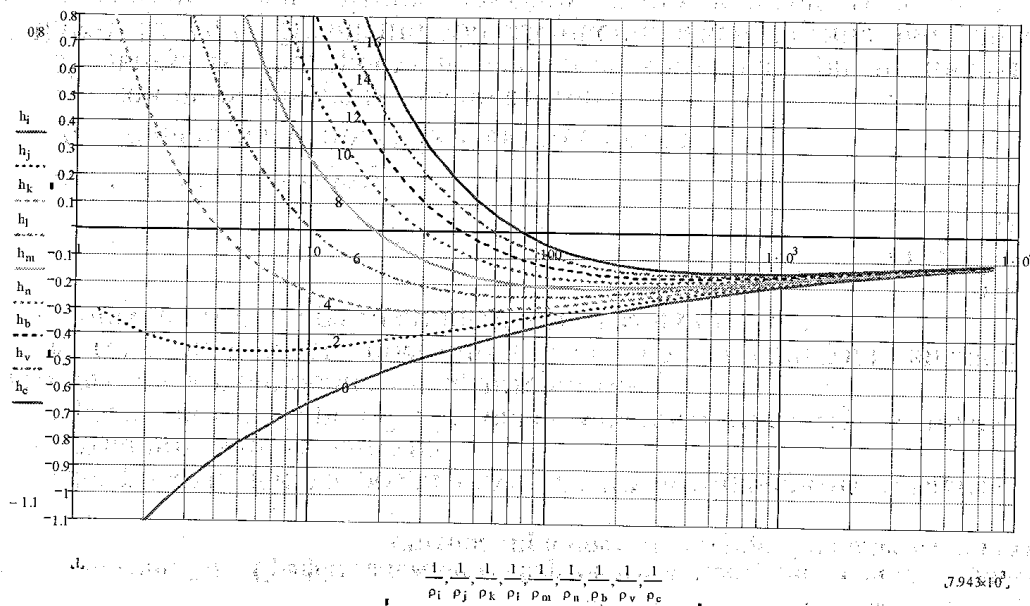


Рис. 3. Графічне зображення функції $h=f(\rho, x_2)$

Варто зауважити, що наведені залежності справедливі для гладкої КНБК без врахування бурового індексу анізотропії. З врахуванням бурового індексу анізотропії, визначеного на основі аналітичних та

експериментальних досліджень [7, с.21-27] графічні залежності мають дещо інший вигляд (рис. 4).

Наведені аналітичні та графічні залежності справедливі для гладких однорозмірних КНБК. Під час буріння свердловин у компоновку низу бурильної колони включають опорно-центруючі пристрої. Проведемо аналогічні аналітичні дослідження впливу навантаження на вибій та сили взаємодії зі стінкою свердловини при встановленні у КНБК центратора.

Наявність центратора в компоновці низу бурильної колони обумовлює певну форму пружної осі колони, розташованої нижче центратора та її пружний стан.

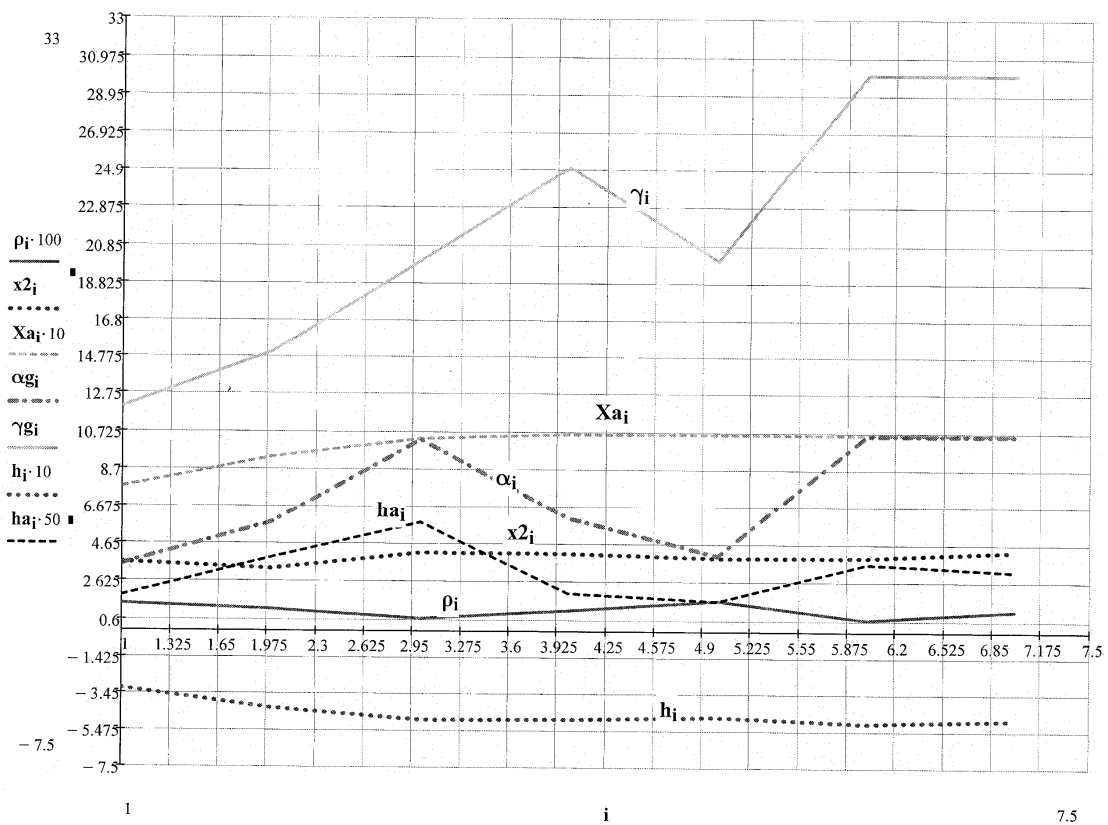


Рис.4. Залежності відстані від долота до точки дотику бурильної колони зі стінкою свердловини, нормальної складової реакції вибою, бурового індексу анізотропії від технологічного зазору між стінкою свердловини та колоною, навантаження на долото (в

**безрозмірних одиницях), зенітного кута свердловини та кута
нахилу пластів**

Обважені бурильні труби на ділянці між долотом та центратором не контактують зі стінкою свердловини.

Вважаємо, що бурильна колона є плоско викривлена із зенітним кутом α . Схема взаємодії бурильної колони зі встановленим на ній центратором з вибоєм та стінкою свердловини показана на рис. 5.

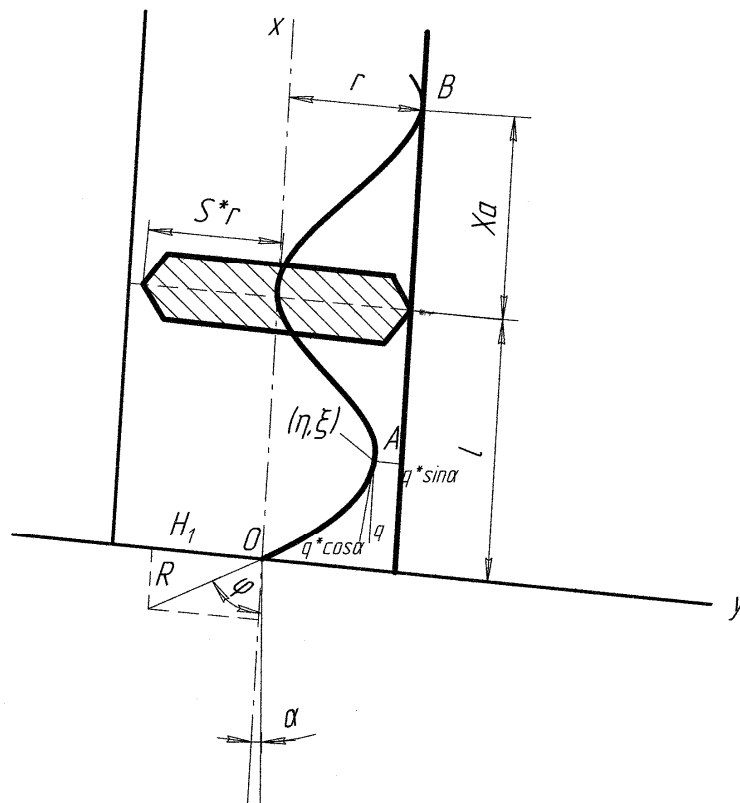


Рис. 5. Схема взаємодії бурильної колони з вибоєм та стінкою свердловини

Для аналітичного дослідження впливу навантаження на долото та сили взаємодії зі стінкою свердловини розглянемо окремо нижню ділянку (від долота до центратора) і верхню (від центратора до точки дотику колони зі стінкою свердловини). Для цього у рівняння (19) підставимо апроксимуючі функції для нижньої та верхньої ділянок.

Для нижньої ділянки апроксимуюча функція така:

$$U_{1a} = \frac{\rho}{2} \left(\sin \frac{2\pi x}{l} + 2S \sin \frac{\pi x}{l} \right), \quad (36)$$

Для верхньої ділянки апроксимуюча функція така:

$$U_{2a} = \frac{\rho}{2} \left[(1+S) + (1-S) \cos \frac{\pi(x-l-x_a)}{x_a} \right], \quad (37)$$

$$S = \frac{D-d_u}{2}$$

Інтегруючи рівняння (19) з використанням функцій (36) та (37), одержимо диференціальне рівняння для нижньої ділянки:

Для першої ділянки:

$$\frac{d^3 U_1}{dx} = -(x_2 - x) \frac{dU_{1a}}{dx} + x + h_1, \quad (38)$$

Тричі проінтегрувавши дане рівняння, отримаємо:

$$U_1 = -(x_2 - x) \int_0^x \int_0^x U_{1a} dx dx - 3 \int_0^x \int_0^x \int_0^x U_{1a} dx dx dx + \frac{x^4}{24} + h_1 \frac{x^3}{6} + k_1 \frac{x^2}{2} + L_1 x + M_1, \quad (39)$$

Аналогічно для верхньої ділянки ($U_1 \rightarrow U_2; h_1 \rightarrow h_2; K_1 \rightarrow K_2; \dots$)

$$\frac{d^3 U_2}{dx^2} = -(x_2 - x) \frac{dU_{2a}}{dx} + x + h_2, \quad (40)$$

$$U_2 = -(x_2 - x) \int_0^x \int_0^x U_{2a} dx dx - 3 \int_0^x \int_0^x \int_0^x U_{2a} dx dx dx + \frac{x^4}{24} + h_2 \frac{x^3}{6} + k_2 \frac{x^2}{2} + L_2 x + M_2, \quad (41)$$

де $k_1, L_1, M_1, k_2, L_2, M_2$ - постійні інтегрування;

h_1, h_2 - постійні, які входять в диференціальні рівняння;

l - відстань від долота до центратора;

x_a - відстань від центратора до точки дотику колони зі стінкою свердловини;

S - радіальний зазор між стінками свердловини і центратором;

ρ - радіальний зазор між трубою та стінкою свердловини;

$$\rho = \frac{r}{m \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad r = \frac{D_c - d}{2}$$

x_2 - навантаження на долото в безрозмірних одиницях.

Для визначення $k_1, L_1, M_1, k_2, L_2, M_2, h_1, h_2, x_a, l, \rho, S, x_2$ використаємо граничні умови:

При $x = 0$:

$$U_1 = 0, \quad (42)$$

$$\frac{d^2U_1}{dx^2} = 0, \quad (43)$$

При $x = l$:

$$U_1 = \rho \cdot S, \quad (44)$$

$$U_2 = \rho \cdot S, \quad (45)$$

$$\frac{dU_1}{dx} = \frac{dU_2}{dx}, \quad (46)$$

$$\frac{d^2U_1}{dx^2} = \frac{d^2U_2}{dx^2}, \quad (47)$$

При $x = l + x_a$:

$$U_2 = \rho, \quad (48)$$

$$\frac{dU_2}{dx} = 0, \quad (49)$$

$$\frac{d^2U_2}{dx^2} = 0, \quad (50)$$

Таким чином, із 13 невідомих визначимо 9 невідомих, виразивши їх через 4 інших (ρ, S, l, x_2), які вважаємо відомими. Тоді:

$$M_1 = 0, \quad (51)$$

$$K_1 = 0, \quad (52)$$

$$L_1 = x_2 \cdot \rho \cdot l \left[\frac{1}{4\pi} + s \cdot \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{\pi^2} \right) + \rho \frac{l^2}{\pi} \left[\frac{1}{8} + s \cdot \left(1 - \frac{4}{\pi} - \frac{24}{\pi} \right) + \frac{\pi \cdot s}{l^3} \right] - \frac{l^3}{24} - h_1 \frac{l^2}{6} \right], \quad (53)$$

$$k_2 = x_2 \rho - \frac{\rho}{2} (1-S) \left[1 + x_a - \frac{x_a}{\pi} \sin \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} \right] - \frac{(1+x_a)}{2} - h_2(1+x_a), \quad (54)$$

$$L_2 = x_2 \rho \left[\left(1 + S \frac{l+x_a}{2} + (1-S) \frac{x_a}{2\pi} \sin \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} \right) \right] + \\ + \rho \left[(1-S) \frac{l+x_a}{2} \frac{x_a}{\pi} \sin \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} - (1-S) \frac{x_a^2}{\pi^2} \left(1 - \cos \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} \right) \right] - \\ - \frac{(l+x_a)^3}{6} - h_2 \frac{(l+x_a)^2}{2} - k_2(l+x_a) \quad (55)$$

$$M_2 = x_2 \frac{\rho}{2} \left[(1+S) \frac{(l+x_a)^2}{2} - (1-S) \frac{x_a^2}{\pi^2} \left(1 - \cos \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} \right) + (1-S)(l+x_a) \frac{x_a}{\pi} \sin \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} \right] - \\ - (1-S)(l+x_a) \frac{x_a^2}{\pi^2} \left(1 - \cos \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} \right) - (1-S) \cdot 3 \frac{x_a^3}{\pi^3} \sin \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} + \\ + (1-S) \cdot 3(l+x_a) \frac{x_a^2}{\pi^2} \cos \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} + (1-S) \frac{(l+x_a)^2}{2} \frac{x_a}{\pi} \sin \frac{\pi(l+x_a)}{x_a} - \\ - \frac{(l+x_a)^4}{24} - h_2 \frac{(l+x_a)^3}{6} - k_2 \frac{(l+x_a)^2}{2} - L_2(l+x_a) + \rho \quad (56)$$

$$h_1 = \rho \left[\frac{x_2}{l} - 1 - \frac{x_a}{2l} + S \left(\frac{2}{\pi} + \frac{x_a}{2l} \right) \right] - \frac{(l+x_a)^2}{2l} - h_2 \frac{x_a}{l}, \quad (57)$$

$$h_2 = \frac{3}{2} (1-S) \rho \left[\left[\frac{x_2 - l}{x_a} \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \right) \right] - \left(1 - \frac{6}{\pi^2} \right) + \frac{4}{x_a^3} \right] - \left(l + \frac{3x_a}{4} \right), \quad (58)$$

$$f(x_a) = \frac{3}{2} \rho \frac{x_2}{x_a} \left[(1-S) \frac{l}{x_a} \left(\frac{8}{\pi^2} S - \frac{1}{2\pi} - \frac{2}{3} \right) - \frac{l^2}{x_a^2} \left[\frac{3}{4\pi} + \frac{2}{3} + S \left(\frac{2}{3\pi} - \frac{24}{\pi^2} + \frac{48}{\pi^3} - \frac{2}{l^3} \right) \right] - \right. \\ \left. - (1-S) \left[\left(1 - \frac{4}{\pi^2} + \frac{4l}{3x_a} \right) + \left(\frac{3}{2} + \frac{l}{x_a} \right) \frac{(x_2 - l) \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \right) + \frac{4}{x_a^2}}{x_a} - \left(1 - \frac{6}{\pi^2} \right) \right] + \frac{1}{8} \left(2 + 9 \frac{x_a}{l} - \frac{l^2}{x_a^2} \right) \right], \quad (59)$$

Для визначення x_a використаємо метод ітерації.

$$x_a = x_{an} + \frac{f(x_a) - x_{an}}{1 - f(x_{a+1})}, \quad (60)$$

$$\begin{aligned}
 f'(x_a) = & \frac{3}{2} \frac{\rho}{x_a^2} x_2 \left[2 \frac{l}{x_a} \left(\frac{8}{\pi^2} S - \left(\frac{1}{2\pi} + \frac{2}{3} \right) \right) - (1-S) \right] + \\
 & + \frac{3}{2} \frac{\rho}{x_a^2} (1-S) \left[(x_2 - l) \left(1 - \frac{4}{\pi^2} \right) \left(2 \frac{l}{x_a} + \frac{3}{2} \right) + \frac{2}{x_a^2} \left(9 + 8 \frac{l}{x_a} \right) + l \left(\frac{1}{3} + \frac{6}{\pi^2} \right) \right] +, \quad (61) \\
 & + \frac{3}{2} \frac{\rho}{x_a^2} 2 \frac{l^2}{x_a} \left[\frac{3}{4\pi} + \frac{2}{3} + S \left(\frac{2}{3\pi} - \frac{24}{\pi^2} + \frac{48}{\pi^3} - \frac{2}{l^3} \right) \right] + \frac{1}{4} \frac{l}{x_a} \left(\frac{9}{2} \frac{x_a}{l} + \frac{l^2}{x_a^2} \right)
 \end{aligned}$$

За допомогою програми MathCAD отримали графічні залежності відстані від долота до точки дотику колони зі стінкою свердловини x_a та нормальної складової h від навантаження X_2 та зазору ρ (рис. 6,7,8) при заданій відстані від центратора до долота $L=0,75$ (безр.од.) та буровому індексу анізотропії $h_a=0,025$.

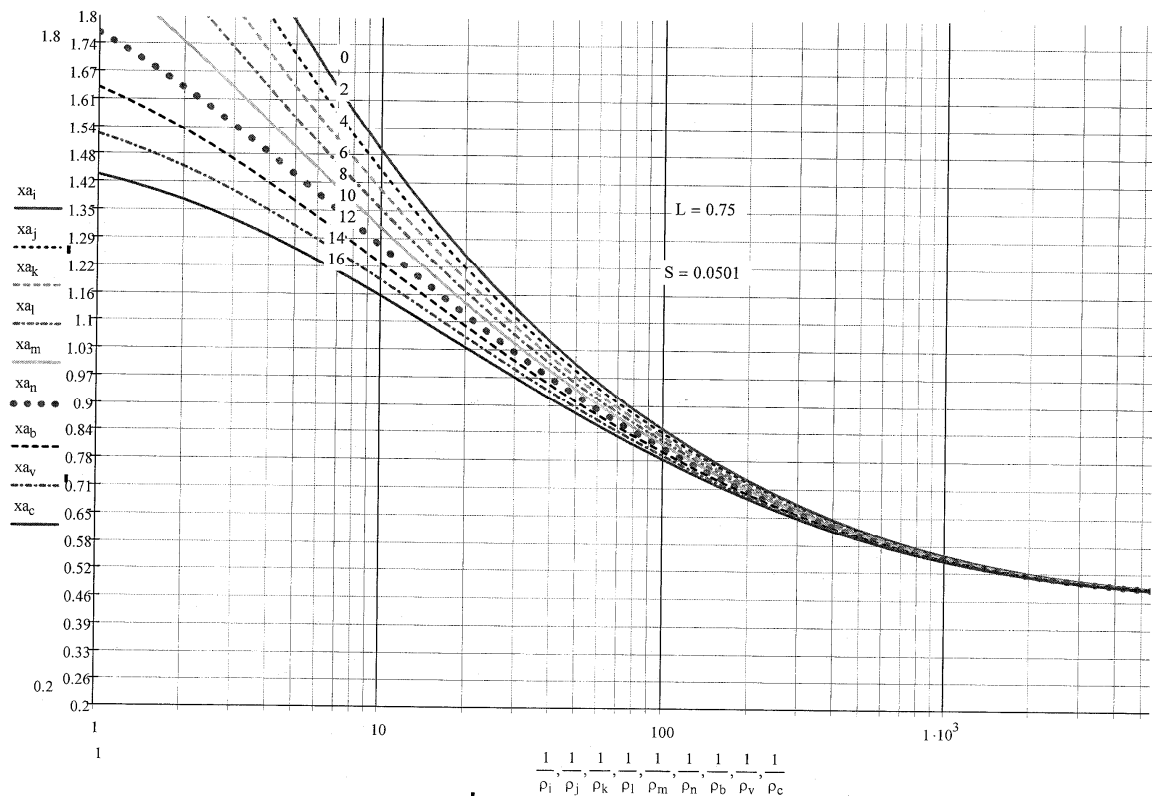


Рис. 6. Графічне зображення функції $x_a=f(\rho, x_2)$

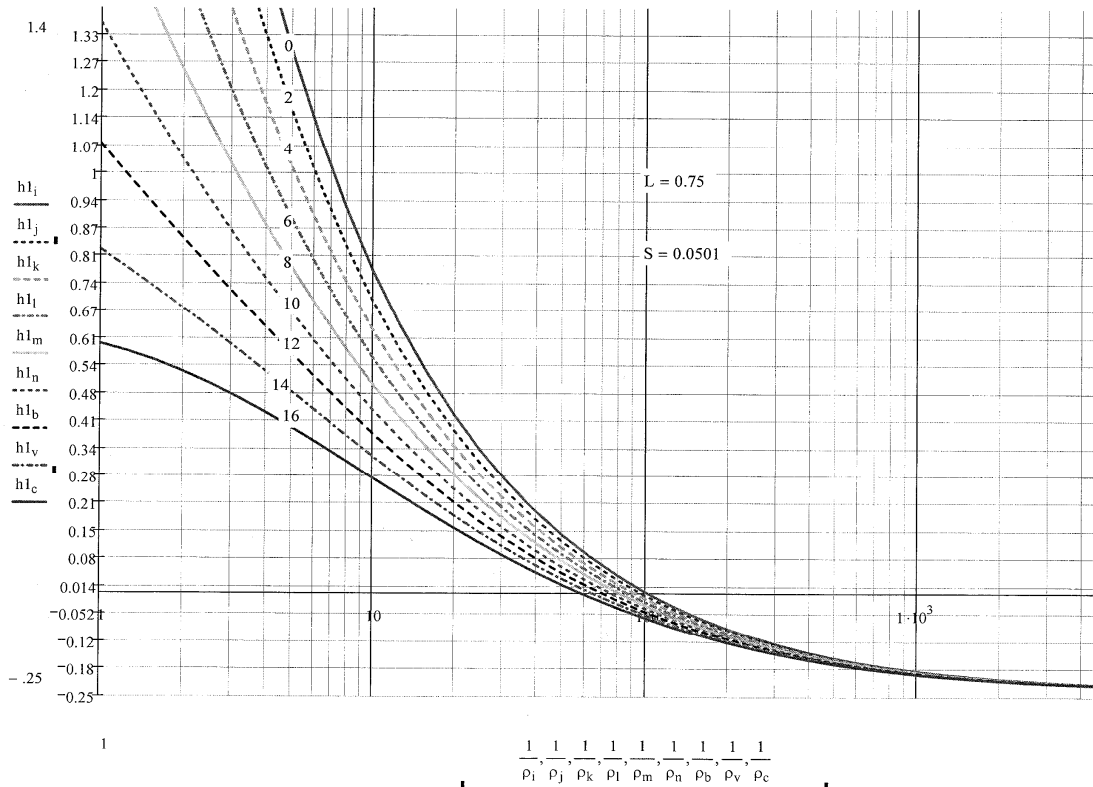


Рис. 7. Графічне зображення функції $h_1=f(\rho, x_2)$

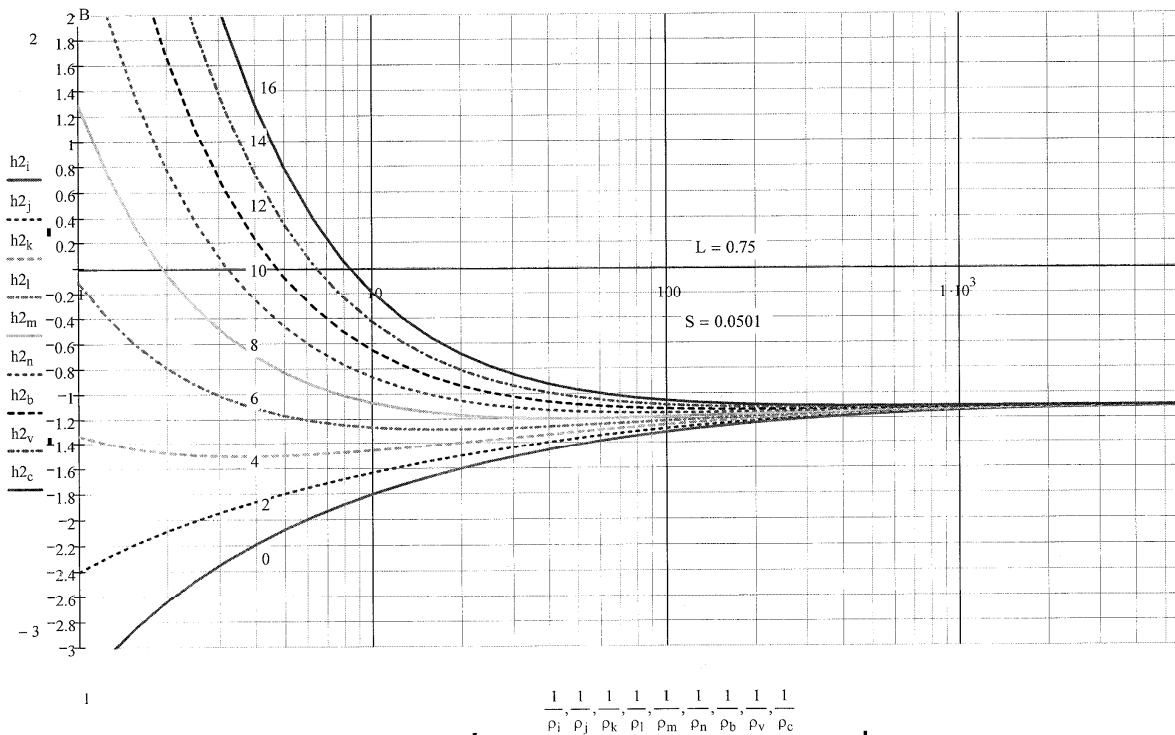


Рис. 8. Графічне зображення функції $h_2=f(\rho, x_2)$

Висновки.

1. Зі збільшенням осьового навантаження на долото та зазору між ОБТ і стінкою свердловини відстань від долота до нижньої точки дотику колони зі стінкою свердловини зменшується.
2. Зі збільшенням зенітного кута та зазору сила тиску колони на стінки свердловини зростає.
3. Буровий індекс анізотропії зменшує відстань від долота до точки дотику як у гладкій КНБК, так і у компоновці низу бурильної колони з центратором.
4. Наявність центратора у компоновці низу бурильної колони збільшує відстань від долота до точки дотику колони зі стінкою свердловини, що дозволяє збільшити навантаження на долото без небезпеки росту зенітного кута.

Література:

1. *Калинин А. Г. Естественное и искусственное искривление скважин / А. Г. Калинин, В. В. Кульчицкий // Москва. – Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Институт компьютерных исследований. – 2006. – 640 с.*
2. *Вудс Г. Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский // М.: Гостоптехиздат. - 1960. – 161 с.*
3. *Калинин А. Г. Бурение наклонных скважин / А. Г. Калинин, Н. А. Григорян, Б. З. Султанов // Справочник. – М.: Недра. – 1990. – 348 с.*
4. *Кривошеев В. В. Искривление скважин в анизотропных породах / В.В. Кривошеев // Томск: НТЛ. – 1999. – 86 с.*
5. *Сулакшин С. С. Направленное бурение / С. С. Сулакшин // М.: Недра. – 1987. – 272 с.*
6. *Коваленко Ю. Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин: дис. на соискание учёной степени доктора физ.-мат. наук: Коваленко Юрий Фёдорович. – М., 2012. – 314 с.*

7. Кочкодан Я. М. Вплив анізотропії гірських порід на просторове орієнтування свердловин / Я. М. Кочкодан, А. І. Васько // Науковий потенціал 2016, Матеріали XII міжнародної наукової інтернет конференції // Київ, 2016. – с. 12-28.

References:

1. Kalinin A. G. *Estestvennoe i iskushtvennoe iskrivlenie skvazhin* / A. G. Kalinin, V. V. Kulchitskiy // Moskva. – Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika». Institut kompyuternyih issledovaniy. – 2006. – 640 s.
2. Vuds G. *Iskrivlenie skvazhin pri burenii* / G. Vuds, A. Lubinskiy // M.: Gostoptehizdat. - 1960. – 161 s.
3. Kalinin A. G. *Burenie naklonnyih skvazhin* / A. G. Kalinin, N. A. Grigoryan, B. Z. Sultanov // Spravochnik. – M.: Nedra. – 1990. – 348 s.
4. Krivosheev V. V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnyih porodah* / V.V. Krivosheev // Tomsk: NTL. – 1999. – 86 s.
5. Sulakshin S. S. *Napravlennoe burenie* / S. S. Sulakshin // M.: Nedra. – 1987. – 272 s.
6. Kovalenko Yu. F. *Geomehanika neftyanyih i gazovyih skvazhin: dis. na soiskanie uchYonoy stepeni doktora fiz.-mat. nauk: Kovalenko Yuriy FYodorovich.* – M., 2012. – 314 s.
7. Kochkodan Ya. M. *Vpliv anizotropiyi girskih porid na prostorove orientuvannya sverdlovin* / Ya. M. Kochkodan, A. I. Vasko // Naukoviy potentsial 2016, Materiali XII mizhnarodnoyi naukovozi internet konferentsiyi // Kiyiv, 2016. – s. 12-28.