

ВПЛИВ ВИРОБОК СВЕРДЛОВИНИ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

¹В.М.Івасів, ¹Р.В.Рачкевич, ²М.М.Яворський, ³А.В.Козлов

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)42002,
public@nung.edu.ua

²БУ "Укрбургаз", 63300, Харківська обл., м. Красноград, вул. Полтавська, 86,
тел. (05744) 7-46-68

³ДАТ "Чорноморнафтогаз", 95000, Україна, АР Крим, м. Сімферополь,
просп. Кірова / провул. Совнаркомівський, 52/1, тел. (0652) 523408,
e-mail: office@gas.crimea.ua

В статті изложено метод анализа напряжено-деформированого состояния бурильной колонны при работе в скважинах осложненных выработками ствола. Рассматриваются случаи расположения труб как в прямолинейных, так и криволинейных участках скважины.

In the article the method of analysis of the stress-deformation state of drill column in the mining holes of complicated cavity and chamfer. The cases of location of pipes are considered both in rectilinear and curvilinear areas of mining hole.

Аналіз виконаних досліджень. Утворення виробок у стовбурі свердловини зі складним профілем зумовлює додаткові навантаження на бурильну колону. Як наслідок, постає потреба в описанні її напружено-деформованого стану, виходячи із розташування та розмірів жолобів чи каверн. Часткове вирішення поставленого завдання висвітлюється в роботі [1]. Вважаючи, що орієнтація та глибина жолобів залежить від напрямку дії та величини притискового зусилля бурильної колони до стінок криволінійного стовбура свердловини, авторами запропоновано методику визначення розмірів та орієнтації жолобів у просторі. У розрахунках вісь бурильної колони і вісь криволінійної ділянки співпадають, а вплив власної ваги колони по всій довжині ділянки замінено зосередженою силою. У роботі [2] наводиться якісна оцінка утворення жолобів у прямолінійних свердловинах, проте не наведено алгоритм визначення розмірів виробок такого роду, а також їх вплив на навантаженість бурильної колони. Авторами роботи [3] описується механізм утворення каверн, методика аналітичного визначення їх розмірів залежно від геологічних умов буріння. На даний час також розроблено прилад НИД-2, призначений для одержання інформації про фактичну форму стовбура свердловини. Завдяки поєднанню в одному корпусі каверноміра та інклінометра і одночасному обробленні сигналів, що від них надходять, вдалося досягнути не тільки вимірювання розмірів виробок, але й їх орієнтації в просторі.

Як бачимо, задачі визначення орієнтації та лінійних розмірів жолобів та каверн знайшли відображення в літературі [1–3]. Натомість питання їх впливу на бурильну колону потребує додаткових досліджень.

Аналітичні дослідження впливу виробок на напружено-деформований стан бурильної ко-

лони. Розглянемо ділянку бурильної колони, яка знаходиться безпосередньо над виробкою (див. рис. 1, варіант 1).

За умови нахилу стовбура пружна вісь знає деформації таким чином, що колона доторкається до стінок свердловини у чотирьох точках: дві знаходяться по краях жолоба чи каверни (точки С та D), інші дві є точками доторкання бурильної колони до стінки свердловини (точки А та В). Впливом колони, що знаходиться поза відрізком АВ, нехтуємо. Використаємо модель вагової балки на двох шарнірних опорах (точки А і В) під час дії двох зосереджених сил у точках С і D. Записавши сукупність диференціальних рівнянь моментів і розв'язавши їх, одержимо функцію пружної осі у вигляді

$$\begin{aligned}
 y_{I1}(x) &= a_{41} q_n \frac{x^4}{EI} + a_{31} \frac{R_A x^3}{EI} + C_1 x + C_2, \\
 &0 \leq x < x_{II}; \\
 y_{I2}(x) &= a_{42} q_n \frac{x^4}{EI} + a_{32} \frac{R_A x^3}{EI} + \\
 &+ a_{33} \frac{R_C x^3}{EI} + \dots + a_{21} \frac{R_C x^2 x_{II}}{EI} + C_3 x + C_4, \quad (1) \\
 &x_{II} \leq x < x_{II} + l_{ВИР}; \\
 y_{I3}(x) &= a_{43} q_n \frac{x^4}{EI} + a_{34} \frac{R_A x^3}{EI} + a_{35} \frac{R_C x^3}{EI} + \\
 &+ a_{22} \frac{R_C x^2 x_{II}}{EI} + \dots + a_{36} \frac{R_D x^3}{EI} + \\
 &+ a_{23} \frac{R_D x^2 l_{ВИР}}{EI} + a_{24} \frac{R_D x^2 x_{II}}{EI} + C_5 x + C_6, \\
 &x_{II} + l_{ВИР} \leq x < 2x_{II} + l_{ВИР}.
 \end{aligned}$$

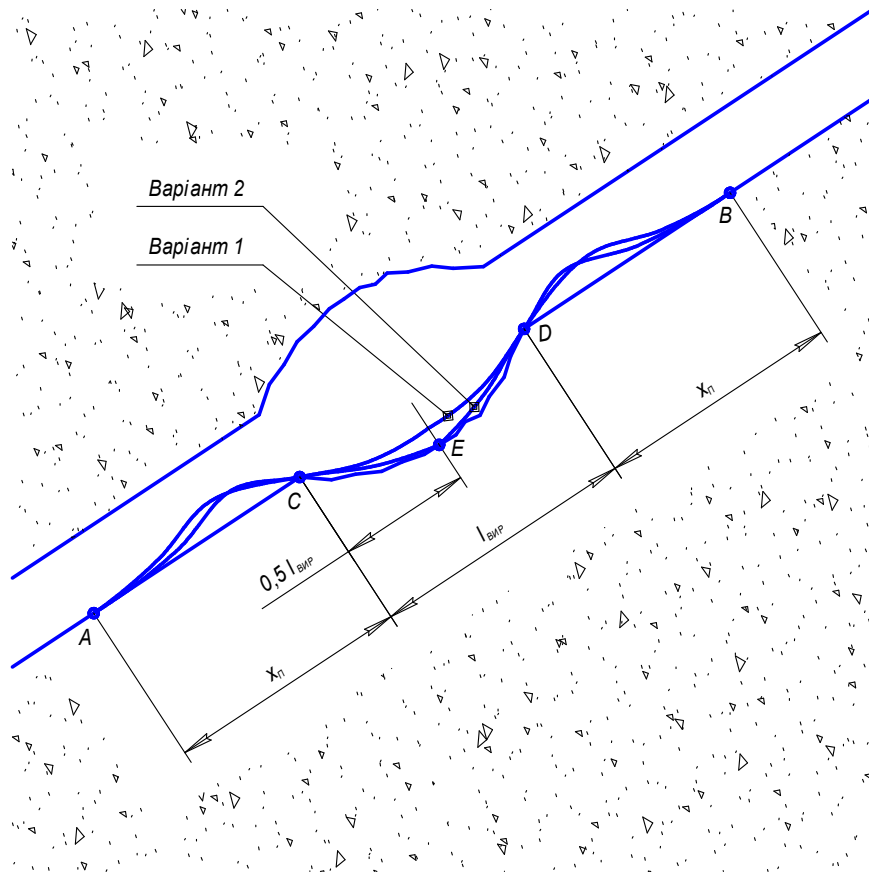


Рисунок 1 – Бурильна колона в прямолинійному стовбурі з виробкою

де: a – ряд коефіцієнтів, одержаних у процесі розв’язку;

C_1, \dots, C_6 – змінні інтегрування;

$x_{\Pi}, l_{ВІР}$ – величини згідно з рисунком 1.

Для визначення $R_A, R_C, R_D, R_B, C_1, \dots, C_6$, x_{Π} використовується система алгебраїчних рівнянь, одержана на основі граничних умов. Помноживши $y_{V1}(x), y_{V2}(x), y_{V3}(x)$ на EI/W і двічі продиференціювавши, одержимо функції напружень на вказаному інтервалі бурильної колони [4]:

$$\sigma_{3Г\Pi}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{\Pi}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } 0 \leq x < x_{\Pi};$$

$$\sigma_{3ГI2}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{I2}(x)}{dx^2}, \quad (2)$$

якщо $x_{\Pi} \leq x < x_{\Pi} + l_{ВІР}$;

$$\sigma_{3ГI3}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{I3}(x)}{dx^2},$$

якщо $x_{\Pi} + l_{ВІР} \leq x < 2x_{\Pi} + l_{ВІР}$.

Рівняння (1) та (2) дійсні у випадку, коли бурильна колона не доторкається до дна виробки (рис. 1, варіант 1), тобто виконується нерівність

$$y_{I2}(x) < h_{ВІР}, \text{ якщо } x = x_{\Pi} + \frac{l_{ВІР}}{2}, \quad (3)$$

де: $h_{ВІР} = \frac{1}{2}(D_{ВІР} - D)$;

$D_{ВІР}$ – діаметр свердловини у місці виробки, м;

D – номінальний діаметр свердловини, м.

Якщо умова (3) не виконується (див. рис. 1, варіант 2), то для одержання функцій пружної осі використовується аналогічна до попередньої розрахункова модель за виключенням реакції, що спричинюється дном виробки. У цьому випадку функції пружної осі матимуть вигляд:

$$y_{\Pi1}(x) = a_{41} q_n \frac{x^4}{EI} + a_{31} \frac{R_A x^3}{EI} + C_1 x + C_2,$$

$$y_{\Pi2}(x) = a_{42} q_n \frac{x^4}{EI} + a_{32} \frac{R_A x^3}{EI} + a_{33} \frac{R_C x^3}{EI} +$$

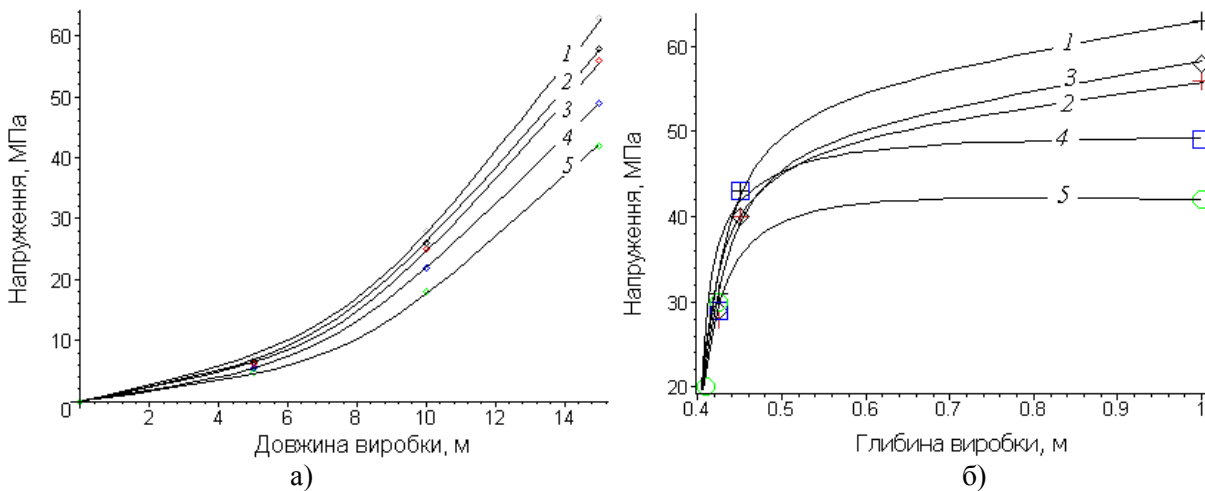
$$+ a_{21} \frac{R_C x^2 x_{\Pi}}{EI} + C_3 x + C_4,$$

$$y_{\Pi3}(x) = a_{43} q_n \frac{x^4}{EI} + a_{34} \frac{R_A x^3}{EI} + a_{35} \frac{R_C x^3}{EI} +$$

$$+ a_{22} \frac{R_C x^2 x_{\Pi}}{EI} + a_{36} \frac{R_E x^3}{EI} + \dots + \quad (4)$$

$$+ a_{23} \frac{R_E x^2 x_{II}}{EI} + a_{24} \frac{R_E x^2 l_{ВИР}}{EI} + C_5 x + C,$$

Як показує практика буріння, значна кількість жолобів та каверн спостерігається і в кри-



1 – ТБПК 114; 2 – ОБТ 146; 3 – ТБПК 127; 4 – ОБТ 178; 5 – ОБТ 203

Рисунок 2 – Залежність напружень згину від довжини а) та глибини б) виробки

$$y_{II4}(x) = a_{44} q_n \frac{x^4}{EI} + a_{37} \frac{R_A x^3}{EI} + a_{38} \frac{R_C x^3}{EI} + a_{25} \frac{R_C x^2 x_{II}}{EI} + a_{39} \frac{R_E x^3}{EI} + \dots + a_{26} \frac{R_E x^2 x_{II}}{EI} + a_{27} \frac{R_E x^2 l_{ВИР}}{EI} + a_{310} \frac{R_D x^3}{EI} + a_{28} \frac{R_D x^2 x_{II}}{EI} + a_{29} \frac{R_D x^2 l_{ВИР}}{EI} + C_7 x + C_8$$

Як і в попередньому випадку, складаємо систему алгебраїчних рівнянь для обчислення невідомих реакцій, змінних інтегрування та величини x_{II} . Відповідно залежності напружень від поточної координати x будуть мати вигляд:

$$\sigma_{зг II1}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{II1}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } 0 \leq x < x_{II};$$

$$\sigma_{зг II2}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{II2}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } x_{II} \leq x < x_{II} + 0,5 l_{ВИР};$$

$$\sigma_{зг II3}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{II3}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } x_{II} + 0,5 l_{ВИР} \leq x < x_{II} + l_{ВИР};$$

$$\sigma_{зг II4}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{II4}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } x_{II} + l_{ВИР} \leq x < 2x_{II} + l_{ВИР}.$$

Використовуючи формули (2) та (5), визначено максимальні напруження, які виникають у буриньних трубах під час роботи в горизонтальній прямолинійній ділянці свердловини, ускладненій виробкою певної довжини та глибини (рис. 2).

вольнійних стовбурах свердловин. Такі умови ще більше підвищують напружено-деформований стан буриньної колони, а отже й імовірність її відмови.

Розглянемо ділянку колони, що розміщена на нижній стінці криволінійного стовбура свердловини з виробкою, крайні точки якої позначено точками С і D (рисунком 3).

У точках А і В буриньна колони доторкається до стінки. Для аналітичного опису напружено-деформованого стану скористаємося моделлю вагової балки на чотирьох шарнірних опорах. У точках А і В прикладені згинаючі моменти M_A, M_B , які враховують вплив колони поза цими точками в напрямку від них. Сукупність рівнянь, що описують пружну вісь, набуває вигляду

$$y_{III1}(x) = \frac{1}{2} \cdot \{k_{11} M_C x^3 + k_{12} q_n x^4 a + k_{13} R_A x^3 a + M_A x^2 + k_{14} M_A x^3\} \cdot (EI a)^{-1} + C_1 x + C_2;$$

$$y_{III2}(x) = -\frac{1}{2} \cdot \{k_{21} M_C b x^2 + k_{22} M_C x^3 + M_D a x^2 + k_{23} M_D x^3 - 0,5 q_n a^2 b x^2 + 0,5 q_n a^3 x^2 + k_{24} q_n a x^3 b + k_{25} q_n a^2 x^3 + k_{26} q_n x^4 b + k_{27} q_n x^4 a + R_C^II a b x^2 + R_C^II a^2 x^2 + k_{28} R_C^II x^3 b + k_{29} R_C^II a x^3\} \times \{EI(a-b)\}^{-1} + C_3 x + C_4;$$

$$y_{III}(x) = -\frac{1}{2} \cdot \left\{ M_D l x^2 + k_{31} M_D x^3 + k_{32} q_n x^4 l + \right. \\ \left. + k_{33} q_n x^4 b + k_{34} q_n x^3 b l + k_{35} q_n x^3 b^2 + \right. \\ \left. + k_{36} q_n b^2 l x^2 + k_{37} q_n b^3 x^2 + k_{38} R_D^{II} x^3 l + \right. \\ \left. + k_{39} R_D^{II} x^3 b + k_{310} R_D^{II} x^2 l b + k_{311} R_D^{II} x^2 b^2 + \right. \\ \left. + k_{312} M_B x^3 + M_B b x^2 \right\} \times \{EI(a-b)\}^{-1} + C_5 x + C_6$$

де: k – коефіцієнти одержані в процесі розв’язку;
 a, b, l – відстань згідно з рисунком 3.

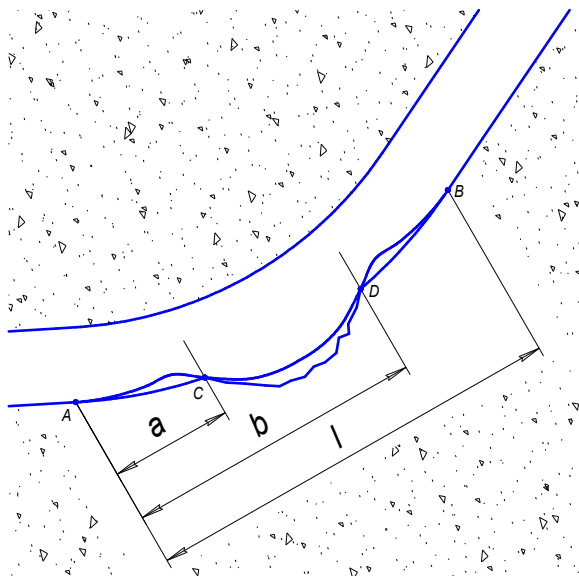


Рисунок 3 – Бурильна колона в криволінійному стовбурі з виробкою

Для знаходження числових значень реакцій, коефіцієнтів C а також величин a, b та l використовують систему рівнянь, що одержується з граничних умов. Напруження визначаються за формулами:

$$\sigma_{зг III1}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{III1}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } 0 \leq x < a;$$

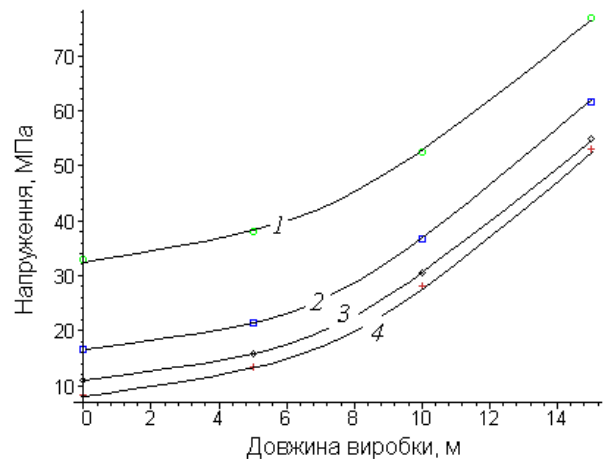
$$\sigma_{зг III2}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{III2}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } a \leq x < b; \quad (6)$$

$$\sigma_{зг III3}(x) = \frac{EI}{W} \frac{d^2 y_{III3}(x)}{dx^2}, \text{ якщо } b \leq x < l.$$

За допомогою одержаних аналітичних залежностей (6) були визначені напруження в тілі труб ОБТ 203, ОБТ 178, ОБТ 146, ТБПВ 127, ТБПВ 114 у процесі експлуатації в криволінійних ділянках свердловини з виробками. Частина результатів зображено на рисунку 4.

Висновки. Загалом можна зазначити, що виробки стовбура свердловини спричинюють значні додаткові навантаження на бурильну колоду. Зокрема, на рисунку 2 бачимо, що жолоб чи каверна довжиною 15 м у прямолінійному стовбурі горизонтальної свердловини мо-

же стати причиною виникнення напружень згину від 40 до 60 МПа залежно від типорозміру бурильних труб. Для порівняння можна сказати, що напруження згину порядку 40 МПа є границею втоми замкової різьби ОБТ 146. Вплив виробок криволінійного стовбура свердловини на напружено-деформований стан ОБТ 146 наведено в таблиці 2. Як бачимо, криволінійні ділянки з інтенсивністю викривлення від 0,29 до 1,15 град / 10 м не становлять “загрози” для ОБТ 146. Проте наявність жолоба чи



1 – $i = 1,15$; 2 – $i = 0,58$; 3 – $i = 0,38$; 4 – $i = 0,29$

Рисунок 4 – Залежність напружень згину в тілі ОБТ 146 за інтенсивності викривлення свердловини, град / 10 м

каверни довжиною 10 м за інтенсивності викривлення 1,15 спричинює напруження згину, що перевищують границю втоми. А виробка довжиною 15 м є небезпечною для даного типорозміру бурильних труб навіть за незначної інтенсивності викривлення стовбура свердловини 0,29 град / 10 м.

Враховуючи зростаючі тенденції до буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин необхідно в ході аналізу напружено-деформованого стану бурильної колони враховувати ті додаткові навантаження, які створюються нерівностями стінок стовбура (жолобами, кавернами, тощо).

Література

1. Жестовский А.Д. Определение аналитическим путем ориентации в пространстве желобных выработок в скважине // Нефтяное хозяйство. – 1972. – № 2. – С. 13-17.
2. Фролов Е.П., Кошелев Н.Н., Алишанян Р.Р. Механизм желобообразования и некоторые основные факторы, определяющие его развитие // Бурение. – 1970. – №7. – С. 3-5.
3. Пейсиков Ю.В. Кавернообразование при бурении скважин // Геология нефти и газа. – 1992. – №6. – С. 26-28.
4. Посацький С.Л. Опір матеріалів. – Львів: Вид-во Львівського університету, 1963. – С. 45-47.