

УДК 539.3

В.В. Гайдайчук, д-р техн. наук
С.М. Худолій, канд. техн. наук
О.М. Андрусенко

ПРО РУХОМІСТЬ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ В КРИВОЛІНІЙНІЙ СВЕРДЛОВИНІ ЗІ СПІРАЛЬНИМИ ГЕОМЕТРИЧНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ

Досліджується рух бурильної колони при виконанні спуско-підйомних операцій в криволінійній свердловині з локалізованими спіральними недосконаlostями осьової лінії. Для визначення однієї частини змінних поставлено пряму задачу статички, для іншої частини – обернену. Розглянуто приклад.

Вступ. Важливою обставиною, яка сприяє ускладненню ситуації в нафтовій і газовій галузях промисловості, є те, що, як правило, лише 35% вуглеводневих палив, які заповнюють тріщини та пори підземних резервуарів, можуть бути добутими при застосуванні традиційної технології добування. Один із способів збільшення об'ємів палив, що відбираються з підземних резервуарів, пов'язаний з прокладанням криволінійних свердловин, які пронизують нафтоносні та газоносні прошарки вздовж їх ламінованої структури, і тому вони покривають більші зони відбору палива. Оскільки із застосуванням такої технології зменшується загальна кількість прохідних колодязів і дебіт криволінійних свердловин виявляється на порядок вищим дебіту вертикальних свердловин, тому найближчим часом буріння свердловин складної конфігурації стане основним в більшості країн світу.

Практичне впровадження технологій буріння глибоких свердловин зі складною просторовою орієнтацією їх траєкторій пов'язано з необхідністю теоретичного моделювання механічних явищ, що супроводжують їх функціонування, з метою прогнозування можливих критичних станів [1, 2, 5]. При цьому одним з найважливіших аспектів даного напрямку є теоретичне моделювання поведінки колон глибокого буріння в криволінійних свердловинах на етапах їх спуску і підйому.

Питання особливостей механічної поведінки БК у вертикальних свердловинах розглянуті в публікації [10]. У роботі [11] досліджується механічна поведінка БК у криволінійних свердловинах на основі моделювання їх абсолютно гнучкими нитками, в [4] це питання вивчається з позицій формулювання прямих і обернених задач згинання криволінійного пружного стержня.

Сучасні методи фізичного та математичного моделювання механіки буриньних колон (БК) в криволінійних свердловинах, базуються, як правило, на представленні колони абсолютно гнучкою нерозтяжною ниткою [8, 9, 12]. Така модель може бути виправдана при виконанні оціночних розрахунків на етапі попереднього проектування, коли траєкторія свердловини задається у вигляді гладкої кривої найпростішого обрису з великими радіусами кривини [7]. Проте в процесі проходки свердловини (особливо дальньої) не вдається досягти її проектної ідеалізованої геометрії і в результаті збурень технологічного або тектонічного характерів на її осьовій кривій виникають локальні геометричні викривлення, що грають роль недосконалостей. Вони можуть мати форму дрібномасштабних тривимірних спіралей змінного діаметру і кроку, плоских гармонік або закруглених зломів. Так як кривини осьової лінії свердловини на таких ділянках різко зростають, БК піддається на них пружному згинанню, в результаті чого різко зростають сили контактної взаємодії колони зі стінкою свердловини і сили опору руху колони. Ці сили нелінійно залежать від значень геометричних параметрів недосконалостей та зі збільшенням останніх можуть спрямовуватися до нескінченності. Тоді виникає явище прихоплення колони та її подальше функціонування стає неможливим [1]. Для опису подібних явищ моделі гнучких ниток не можуть бути застосовані, і повинна використовуватися теорія пружних криволінійних стержнів [3].

Розв'язувальні співвідношення теорії криволінійних стержнів. При моделюванні пружного деформування буриньної колони в похило-скерованій свердловині з геометричними недосконалостями приймемо, що викривлення проектної траєкторії свердловини, яке викликане порушенням технології буріння або механічними неоднорідностями тектонічних структур, не може супроводжуватися утворенням зломів її осьової лінії, яка є диференційованою за всіма трьома незалежними просторовими змінними. При цьому, однак, якщо ці недосконалості є дрібно масштабними, то вони можуть наближатися до геометричних сингулярностей. Будемо вважати також, що осьові лінії свердловини і БК збігаються.

Наведемо основні співвідношення, що визначають геометрію осьової лінії криволінійної свердловини. Для їх подання можна застосовувати два способи параметризації [3]. У першому способі положення точки на кривій задається координатою s , вимірюваною довжиною осьової лінії від деякої початкової точки до поточної (натуральна параметризація), у другому - використовується деякий довільний параметр ϑ , який може бути більш зручний для опису загальних властивостей кривої.

Нехай рівняння осьової лінії свердловини в декартовій системі координат $Oxyz$ мають вигляд

$$x = x(s), \quad y = y(s), \quad z = z(s) \quad (1)$$

або

$$\vec{\rho} = \vec{\rho}(s). \quad (2)$$

Випишемо рівності, що визначають її радіуси кривини та кручення [6]

$$R = \left[(x'')^2 + (y'')^2 + (z'')^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad T = R^{-2} \begin{vmatrix} x' & y' & z' \\ x'' & y'' & z'' \\ x''' & y''' & z''' \end{vmatrix}^{-1}, \quad (3)$$

де штрихом праворуч, зверху позначена похідна за s .

Співвідношення (2), (3) дозволяють знайти орти $\vec{\tau}$, \vec{n} , \vec{b} рухомого трієдра

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{\rho}}{ds}, \quad \vec{n} = R \frac{d\vec{\tau}}{ds}, \quad \vec{b} = \vec{\tau} \times \vec{n}, \quad (4)$$

і тим самим повністю визначити геометричні характеристики траєкторії свердловини.

Якщо крива (1) визначена через параметр ϑ

$$x = x(\vartheta), \quad y = y(\vartheta), \quad z = z(\vartheta), \quad (5)$$

то диференціювання по змінній s замінюється диференціальним оператором $Dd\vartheta$, де метричний множник D підраховується за формулою

$$D = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}. \quad (6)$$

Відзначимо, що при розв'язанні задач про згинання БК у свердловині з недоскональностями складної форми зручно застосовувати рівності (1) та (5) разом, використовуючи їх паралельно для виконання різних геометричних перетворень.

Пружне деформування трубчастої БК у криволінійній свердловині в процесі буріння і виконання спуско-підймальних операцій здійснюється під дією розподілених сил тяжіння \vec{f}^{gr} , сил \vec{f}^c контактної взаємодії між БК і стінкою свердловини, сил \vec{f}^{fr} і моментів \vec{m}^{fr} фрикційної взаємодії, а також зосереджених крайових сил і моментів, прикладених у точці підвісу БК і в точці її контакту з дном свердловини. Виникаючі при цьому

в кожному елементі БК внутрішня сила \vec{F} і момент \vec{M} задовольняють векторним рівнянням рівноваги [3]

$$\frac{d\vec{F}}{ds} = -\vec{f}^{gr} - \vec{f}^c - \vec{f}^{fr}, \quad \frac{d\vec{M}}{ds} = -\vec{\tau} \times \vec{F} - \vec{m}^{fr}, \quad (7)$$

У загальному випадку найбільш зручно їх записувати в рухомій системі осей (u, v, w) , в якій вісь w спрямована вздовж орта $\vec{\tau}$, а осі u, v орієнтовані уздовж головних центральних осей інерції поперечного перерізу БК. Оскільки ця система повертається в міру руху вздовж координати s , необхідно повні похідні $d\vec{F}/ds$, $d\vec{M}/ds$ представити в рухомій системі. Тоді

$$\frac{d\vec{F}}{ds} = \frac{\tilde{d}\vec{F}}{ds} + \vec{\omega}_\chi \times \vec{F}, \quad \frac{d\vec{M}}{ds} = \frac{\tilde{d}\vec{M}}{ds} + \vec{\omega}_\chi \times \vec{M}. \quad (8)$$

Тут позначкою \sim позначена операція локального диференціювання, $\vec{\omega}_\chi$ - вектор Дарбу, обчислюваний за формулою

$$\vec{\omega}_\chi = \frac{1}{R} \vec{b} + \left(\frac{1}{T} + \frac{d\chi}{ds} \right) \vec{\tau},$$

χ - кут, відлічуваний від орта \vec{n} до вісі u .

$$p = \frac{1}{R} \sin \chi, \quad q = \frac{1}{R} \cos \chi, \quad r = \frac{1}{T} + \frac{d\chi}{ds}. \quad (9)$$

Підставляючи праві частини цих рівностей в рівняння (7), отримаємо

$$\frac{\tilde{d}\vec{F}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{F} - \vec{f}^{gr} - \vec{f}^c - \vec{f}^{fr}, \quad \frac{\tilde{d}\vec{M}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{M} - \vec{\tau} \times \vec{F} - \vec{m}^{fr}. \quad (10)$$

Випишемо відповідні першому рівнянню три скалярних рівняння рівноваги сил

$$\begin{aligned} \frac{dF_u}{Dd\vartheta} &= \left(\frac{1}{T} + \frac{d\chi}{Dd\vartheta} \right) F_v - \frac{1}{R} \cos \chi \cdot F_w - f_u^{gr} - f_u^c, \\ \frac{dF_v}{Dd\vartheta} &= \frac{1}{R} \sin \chi \cdot F_w - \left(\frac{1}{T} + \frac{d\chi}{Dd\vartheta} \right) \cdot F_u - f_v^{gr} - f_v^c, \\ \frac{dF_w}{Dd\vartheta} &= \frac{1}{R} \cos \chi \cdot F_u - \frac{1}{R} \sin \chi \cdot F_v - f_w^{gr} - f_w^{fr}. \end{aligned} \quad (11)$$

Враховуючи, що осі головного тригранника (u, v, w) є головними осями згину та кручення елемента стержня, компоненти M_u , M_v , M_w моменту \vec{M} представимо у вигляді

$$M_u = Ap = \frac{A}{R} \sin \chi, \quad M_v = Aq = \frac{A}{R} \cos \chi, \quad M_w = Cr = C \left(\frac{1}{T} + \frac{d\chi}{ds} \right), \quad (12)$$

де $A = EI$; $C = GI_0$; E, G - модулі пружності матеріалу БК при розтяганні і зсуві; I, I_0 - осьовий і полярний моменти інерції поперечного перерізу труби БК.

Вводячи позначення $\chi = h_1$, $d\chi/d\vartheta = dh_1/d\vartheta = h_2$, за допомогою рівностей (12) друге векторне рівняння (10) приведемо до системи трьох скалярних рівнянь рівноваги моментів

$$\begin{aligned} \frac{1}{D} \left[\frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sinh_1 + \frac{1}{R} \cosh_1 \cdot h_2 \right] &= \frac{A-C}{A} \cdot \frac{1}{R} \cosh_1 \left(\frac{1}{T} + \frac{h_2}{D} \right) + \frac{F_v}{A}, \\ \frac{1}{D} \left[-\frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cosh_1 + \frac{1}{R} \sinh_1 \cdot h_2 \right] &= \frac{A-C}{A} \cdot \frac{1}{R} \sinh_1 \left(\frac{1}{T} + \frac{h_2}{D} \right) + \frac{F_u}{A}, \\ \frac{1}{D} \left[\frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{D} \right) h_2 + \frac{1}{D} \frac{dh_2}{d\vartheta} \right] &= -\frac{m_w^{fr}}{C}. \end{aligned} \quad (13)$$

Якщо геометрія (1) осрової лінії свердловини відома, рівняння (11), (13) дозволяють сформулювати завдання про контактну взаємодію БК з її стінкою в процесі буріння і виконання спуско-підймальних операцій.

Постановка оберненої задачі про згинанні БК у криволінійній свердловині. Система шести рівнянь (11), (13) містить не шість невідомих функцій внутрішніх сил і моментів, а тільки три функції сил $F_u(\vartheta)$, $F_v(\vartheta)$, $F_w(\vartheta)$ і функцію кута пружного кручення χ , через яку при заданих R і T обчислюються моменти (12). Тим не менше вона є недовизначеною, оскільки в неї входять також зовнішні розподілені сили контактної взаємодії $f_u^c(\vartheta)$, $f_v^c(\vartheta)$, що підлягають визначенню, і сила $f_w^{fr}(\vartheta)$, і момент $m_w^{fr}(\vartheta)$ сил тертя. Задачі механіки твердих деформованих тіл, в яких внутрішні сили (або моменти) частково відомі, а деякі зовнішні сили (зазвичай це контактні сили або сили тертя) підлягають визначенню, називаються оберненими.

Для формулювання оберненої задачі в даному випадку зведемо систему (13) до вигляду

$$\begin{aligned}
 F_u &= -\frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cosh_1 - \frac{A}{RT} \sinh_1 + \frac{C}{R} \left(\frac{1}{T} + \frac{h_2}{D} \right) \sinh_1, \\
 F_v &= \frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sinh_1 - \frac{A}{RT} \cosh_1 + \frac{C}{R} \left(\frac{1}{T} + \frac{h_2}{D} \right) \cosh_1, \\
 \frac{dh_2}{d\vartheta} &= -\frac{D^2}{C} m_w^{fr} - D \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{1}{D} \frac{dD}{d\vartheta} h_2.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Продиференціюємо за ϑ обидві частини двох перших рівностей цієї системи, після чого прирівняємо їх праві частини правим частинам двох перших рівностей (11). З урахуванням останньої рівності системи (14) отримуємо

$$\begin{aligned}
 f_u^c &= -\frac{C \cdot h_2}{D^2} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sinh_1 - \frac{1}{R} \cosh_1 \cdot F_w - \frac{A-C}{RT^2} \cosh_1 + \frac{C \cdot h_2}{DRT} \cosh_1 + \\
 &+ \frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left[\frac{d}{Dd\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \right] \cosh_1 + \frac{A}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sinh_1 + \frac{A}{RD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{T} \right) \sinh_1 + \\
 &+ \frac{A-C}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sinh_1 + \frac{\sinh_1}{R} m_w^{fr} - f_u^{gr}, \\
 f_v^c &= -\frac{C \cdot h_2}{D^2} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cosh_1 + \frac{1}{R} \sinh_1 \cdot F_w + \frac{A-C}{RT^2} \sinh_1 - \frac{C \cdot h_2}{DRT} \sinh_1 - \\
 &- \frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left[\frac{d}{Dd\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \right] \sinh_1 + \frac{A}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cosh_1 + \frac{A}{RD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{T} \right) \cosh_1 + \\
 &+ \frac{A-C}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cosh_1 + \frac{\cosh_1}{R} m_w^{fr} - f_v^{gr}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

За допомогою рівностей (15) підрхуємо повну силу контактної взаємодії БК і стінки свердловини

$$f^c = \sqrt{(f_u^c)^2 + (f_v^c)^2}. \tag{16}$$

Будемо вважати, що при бурінні і виконання спуско-підймальних операцій БК одночасно здійснює осьовий рух зі швидкістю \dot{w} і обертається з кутовою швидкістю ω . Тоді повну силу тертя $f^{fr} = \mu \cdot f^c$ можна розкласти на дві взаємно перпендикулярні складові

$$f_w^{fr} = \pm\mu \cdot f^c \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}, \quad f_\omega^{fr} = \pm\mu \cdot f^c \frac{\omega d}{2\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}, \quad (17)$$

які пропорційні відповідним компонентам швидкостей \dot{w} і $\omega d / 2$. Тут μ - коефіцієнт тертя, d – зовнішній діаметр труби БК. Перша з цих сил перешкоджає осьовому руху БК, друга спрямована в окружному напрямку і призводять до виникнення розподіленого моменту сил тертя

$$m_w^{fr} = f_\omega^{fr} \cdot \frac{d}{2} = \pm\mu \cdot f^c \frac{\omega d^2}{4\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}. \quad (18)$$

Знаки « \pm » у формулах (17), (18) вибираються залежно від напрямків руху і обертання БК. У виразі для f_w^{fr} знак «-» відповідає процедурі підйому БК, знак «+» - її спуску і процесу буріння.

Виведені в цьому підрозділі співвідношення дозволяють сформулювати систему рівнянь пружного згинання БК у свердловині з заданою осью лінійю (1).

Вхідні сюди компоненти f_u^{gr} , f_v^{gr} , f_w^{gr} розподілених сил тяжіння відомі і визначаються так

$$\begin{aligned} f_u^{gr} &= -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \cosh_1 + b_z \sinh_1), \\ f_v^{gr} &= F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \sinh_1 - b_z \cosh_1), \\ f_w^{gr} &= -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g\tau_z, \end{aligned} \quad (19)$$

де F - площа поперечного перерізу труби БК, γ_{st} - щільність матеріалу труби, γ_l - щільність промивальної рідини.

Шукані змінні підраховуються чисельно. Для інтегрування перших трьох рівнянь системи використовується метод Рунге-Кутта. На кожному кроці його реалізації спочатку обчислюються функції $h_1(\vartheta_i)$, $h_2(\vartheta_i)$, $F_w(\vartheta_i)$, потім по їх знайденим значенням підраховуються інші невідомі $F_u(\vartheta_i)$, $F_v(\vartheta_i)$, $f_w^{fr}(\vartheta_i)$, $m_w^{fr}(\vartheta_i)$. Після цього здійснюється наступний крок інтегрування.

Результати дослідження згинання БК у свердловині зі спіральними геометричними недосконаlostями. При бурінні криволінійних свердловин часто виникають ситуації, коли внаслідок різкого порушення однорідності тектонічної структури або технології

буріння свердловини траєкторія відхиляється від проектної і на ній виникають локальні геометричні недосконалості. Зазвичай вони мають вигляд збурення у формі тривимірної спіралі, плоскою гармоніки або місцевого згладженого злому. У даній роботі розглянуто випадок спіральних недосконалостей. Прийнято, що в проектному стані осьова лінія свердловини являє собою чверть дуги еліпса з півосями H , L , у площині xOz . Для цієї геометрії вирішується поставлена вище задача про визначення внутрішніх і зовнішніх силових факторів, що діють на БК при її русі. Потім в геометрію осової лінії свердловини вводиться викривлення у формі спіралі з кроком λ і змінним радіусом. Тоді рівняння (5) в цьому випадку приводяться до вигляду

$$\begin{aligned} x &= L \cos \vartheta - h \cos \left(k \int_{3\pi/2}^{\vartheta} \sqrt{L^2 \sin^2 \theta + H^2 \cos^2 \theta} d\theta \right) \frac{H \cos \vartheta}{\sqrt{L^2 \sin^2 \vartheta + H^2 \cos^2 \vartheta}}, \\ y &= h \sin \left(k \int_{3\pi/2}^{\vartheta} \sqrt{L^2 \sin^2 \theta + H^2 \cos^2 \theta} d\theta \right), \\ z &= H \sin \vartheta - h \cos \left(k \int_{3\pi/2}^{\vartheta} \sqrt{L^2 \sin^2 \theta + H^2 \cos^2 \theta} d\theta \right) \frac{L \sin \vartheta}{\sqrt{L^2 \sin^2 \vartheta + H^2 \cos^2 \vartheta}}, \end{aligned} \quad (3\pi/2 \leq \vartheta \leq 2\pi) \quad (20)$$

де α - коефіцієнт при показнику експоненти (функції Гауса), який визначає швидкість спадання $h(\vartheta)$; ϑ_c - значення параметра з максимальним $h(\vartheta) = h_c$, і вирішується задача про визначення внутрішніх і зовнішніх сил; k - частота спіралі, що показує скільки її витків укладеться на відріжку $0 \leq \vartheta \leq 2\pi$ кривої (рис. 1).

Користуючись цими рівностями за формулами (3) підраховуються радіуси кривини та кручення. Потім за формулою (6) його метричний множник D , що дозволяє перейти до натуральної параметризації кривої (20), підрахувати орти \vec{n} , \vec{b} , $\vec{\tau}$, тригранника Френе і перейти до інтегрування системи. Всі ці змінні описуються громіздкими виразами і тут не наводяться.

При виконанні спуско-підймальних операцій із заданим відношенням $v = \frac{\dot{w}}{\omega d/2}$ (відношення лінійних швидкостей осового та обертального рухів елемента зовнішньої поверхні труби БК) шукані функції h_1 , h_2 , F_w

при $\vartheta = 3\pi/2$ дорівнюють нулю, але відмінні від нуля сили тяжіння (19). Це дозволяє підрахувати в цій точці змінні f_u^c , f_v^c , f_w^{fr} , m_w^{fr} , F_u , F_v , і зробити один крок інтегрування перших трьох рівнянь системи, а потім за такою ж схемою продовжувати рішення системи на наступних кроках до точки $\vartheta = 2\pi$.

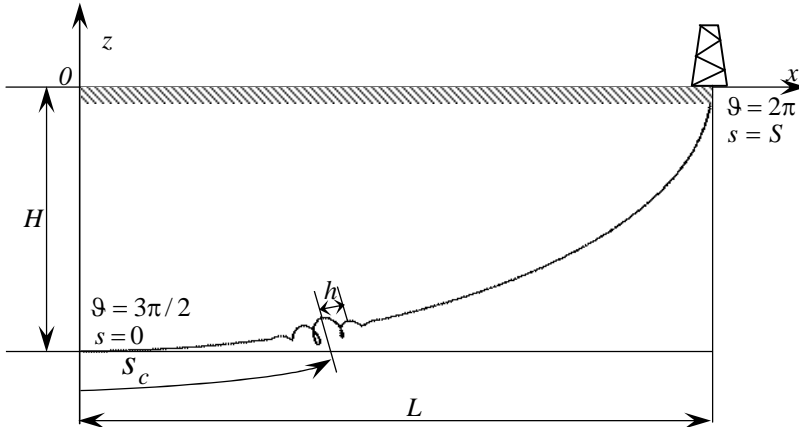


Рис. 1. Схема криволінійної свердловини зі спіральними недосконалостями

За розробленою методикою виконано комп'ютерне моделювання пружного згинання БК в еліптичній свердловині зі спіральними недосконалостями при наступних значеннях характерних параметрів: $L = 4000\text{м}$, $H = 2000\text{м}$, $d = 0,1683\text{м}$, $\delta = 0,01\text{м}$ - товщина труби БК, $E = 2,1 \cdot 10^{11}\text{Па}$, $G = 0,8077 \cdot 10^{11}\text{Па}$, $\gamma_{st} = 7850\text{кг/м}^3$, $\gamma_l = 1500\text{кг/м}^3$, $\mu = 0,2$, $\nu = 1$.

У табл. 1 наведено результати розрахунків для випадків, коли крок спіралі недосконалостей складав $\lambda = 96,88$ і $48,44\text{м}$, а центри з порівняно невеликою амплітудою $h_c = 2\text{м}$ розташовані посередині першої, другої, третьої та четвертої чвертей довжини осової лінії свердловини при виконанні операції підйому БК. Вони свідчать про те, що з перенесенням зони недосконалостей на більш викривлені ділянки осової лінії свердловини сила $F_w(S)$ і момент $M_w(S)$ помітно збільшуються (позиції 1 - 4 в табл. для випадку $\lambda = 96,88\text{м}$ та позиції 5 - 8 для випадку $\lambda = 48,44\text{м}$).

Таблиця 1

Значення сил і моментів у точці підвісу БК у свердловині з геометричними недосконаlostями

№ п/п	λ , м	s_c , м	$F_w(S)$, Н	$M_w(S)$, Нм
1	96,88	605,5	$0,821 \cdot 10^6$	$17,0 \cdot 10^3$
2	—	1816,6	$0,980 \cdot 10^6$	$30,3 \cdot 10^3$
3	—	3027,6	$1,326 \cdot 10^6$	$59,5 \cdot 10^3$
4	—	4238,7	$1,657 \cdot 10^6$	$87,2 \cdot 10^3$
5	48,44	605,5	$2,966 \cdot 10^6$	$197,5 \cdot 10^3$
6	—	1816,6	$7,655 \cdot 10^6$	$592,0 \cdot 10^3$
7	—	3027,6	$14,76 \cdot 10^6$	$1189,7 \cdot 10^3$
8	—	4238,7	$20,87 \cdot 10^6$	$1703,6 \cdot 10^3$

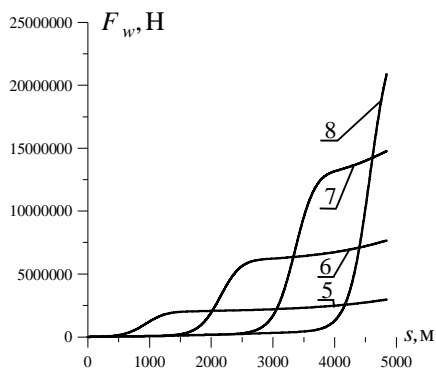


Рис. 2. Графіки зміни поздовжньої сили F_w для чотирьох позицій розташування спіральних недосконаlostей ($H = 2000$ м, $L = 4000$ м, $\lambda = 48,44$ м, $h_c = 2$ м, $\nu = 1$)

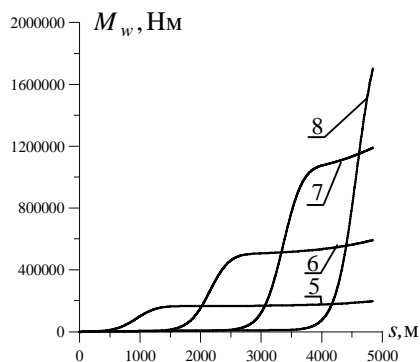


Рис. 3. Графіки зміни крутного моменту M_w для чотирьох позицій розташування спіральних недосконаlostей ($H = 2000$ м, $L = 4000$ м, $\lambda = 48,44$ м, $h_c = 2$ м, $\nu = 1$)

Залежності $F_w(s)$ для недосконаlostей з довжиною хвилі $\lambda = 48,44$ м при різних s_c показані на рис. 2. Номери кривих відповідають номерам позицій в табл. Відзначимо, що в усіх випадках на ділянках зміни змінної s , що містять локалізовані недосконаlostей, функція $F_w(s)$ швидко зростає. Причому, якщо недосконаlostей локалізовані на майже

горизонтальній ділянці свердловини (крива 5 на рис. 2), то функція $F_w(s)$ отримує порівняно невелике збільшення. Якщо вони розташовані у другій чверті, то на кривій 6 в зоні їх локалізації з'явилась ділянка більш швидкого зростання. З подальшим перенесенням недосконалостей величини стрибків функції $F_w(s)$ на недосконалостях стають ще більше (криві 7, 8 на рис. 2). У цих випадках сили опору виявляються найбільш чутливими до недосконалостей.

Аналогічні закономірності простежуються і для функції $M_w(s)$, представленої на рис. 3.

Аналіз представлених діаграм дозволяє зробити висновок, що недосконалості становлять велику небезпеку, якщо вони розташовані в більш викривлених зонах з найбільшими значеннями функції $T(s)$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Худолій С.М., Гловач Л.В. Сучасні методи теоретичного моделювання стану бурильної колони у похило-скерованих свердловинах // Нафтова та газова промисловість. – 2009. - №1. – С. 26 – 30.
2. Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Соловьев И.Л., Горбунович И.В. Квазистатические критические состояния колонн глубокого бурения // Проблемы прочности. – 2006. – № 5. – С.109 – 119.
3. Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Кошкин В.Л. Упругое деформирование, устойчивость и колебания гибких криволинейных стержней. – Киев: Наук. думка, 1992. – 344 с.
4. Гуляев В.И., Луговой П.З., Худолій, С.Н., Гловач Л.В. Теоретическая идентификация сил сопротивления продольному перемещению бурильных колонн в криволинейных скважинах // Прикладная механика. – 2007. – Т.43, №11. – С. 80 – 89.
5. Мислюк М. А., Рибич І. Й., Яремчук Р.С. Буріння свердловин. Т. 3. Вертикальне та скероване буріння. – Київ: Інтерпрес Лтд., 2004. – 294 с.
6. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. – М.: Наука, 1974. – 180 с.
7. Чан Суан Дао, Ширинзаде С.А. Новые профили наклонно-направленных скважин на месторождениях «Белый Тигр» и «Дракон» // Азербайджан. нефт. хоз-во. – 1999. – №1. – С. 18 – 26.
8. Aadnoy B. S. and Andersen K. Design of oil wells using analytical friction models // J. Petroleum Sci. Eng. – 2001. – 32, No. 1. – P. 53 – 71.
9. Choe Jonggeun, Schubert J. J., and Juvkam-Wold H. C. Well-control analyses on extended-reach and multilateral trajectories // SPE Drilling and Completion. – 2005. – June. – P. 101 – 108.
10. Gulyayev V.I., Gaidachuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings // J. of Petroleum Science and Engineering, 2009. 67. P. 140 – 148.
11. Sawaryn S. J. and Thorogood J. L. A compendium of directional calculations based on the minimum curvature method // SPE Drilling and Completion. – 2005. – March. – P. 24 – 36.
12. Sheppard M.C. Designing well paths to reduce drag and torque // SPE Drilling Eng. - 1987. – December. – P. 344 – 350.

В Гайдайчук В.В., Худолій С.Н., Андрусенко Е.Н.

**О ПОДВИЖНОСТИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В КРИВОЛИНЕЙНОЙ СКВАЖИНЕ
СО СПИРАЛЬНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ.**

Исследуется движение бурильной колонны при выполнении спуско-подъемных операций в криволинейной скважине с локализованными спиральными несовершенствами осевой линии. Для определения одной части переменных поставлена прямая задача статики, для другой части – обратная задача. Рассмотрен пример.

Gaidaichuk V.V., Hudoliy S.N., Andrusenko E.N.

**ON MOVEMENT OF A DRILL STRING IN CURVILINEAR BORE-HOLE WITH
SPIRAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS.**

Motion of a drill string at fulfillment of raising-lowering operations in curvilinear bore-hole with localized geometrical imperfections of axial line is considered. The direct and inverse problems of statics are stated for different parts of unknown variables. An example is analyzed.