

Висновок. Розв'язана плоска задача електропружності для п'єзоелектричної площини з отворами і тріщинами, коли на прямолінійній границі задано значення електричного потенціалу, на нескінченності – однорідний потік електричного поля, перпендикулярний прямолінійній границі. Чисельними дослідженнями показано, що вплив отвору, тріщини на розподіл напружень в півплощині є суттєвим, і нехтувати ним при дослідженні не варто. Наближення отвору до прямолінійної границі викликає збільшення концентрацій напружень в точках перемички біля отвору та в точках прямолінійної границі. Якщо тріщина розташована перпендикулярно прямолінійній границі, то вона не створює додаткового електропружного поля в півплощині.

Література

1. Калоеров С.А., Глуценко Ю.А. Электроупругое состояние многосвязной пьезоэлектрической полуплоскости с отверстиями и трещинами // Дин. системы.– 2000.– Вып. 16.– С. 107–116.
2. Калоеров С.А., Баева А.И., Бороненко О.И. Двумерные задачи электро- и магнитоупругости для многосвязных областей. – Донецк: Юго-Восток, 2007. – 268 с.
3. Статические и динамические задачи электроупругости для составных многосвязных тел / Д.И. Бардозкас, А.И. Зобнин, Н.А. Сенник и др. – М.: КомКнига, 2005. – 376 с. (Математическое моделирование в задачах механики связанных полей, в 2 т. Т. 2)
4. Глуценко Ю.А., Хорошев К.Г. Электроупругое состояние конечной пьезоэлектрической пластинки с отверстиями и трещинами при заданных на контурах значениях потенциала // Вісн. Донец. ун-та. Сер. А. Природ. науки. – 2008. – № 1. – С. 211–218
5. Хорошев К.Г. Электроупругое состояние бесконечной многосвязной пьезоэлектрической пластинки при заданных на ее контурах значениях потенциала // Прикл. механика. – 2010. – Т. 46, № 6. – С. 88–97
6. Berlincourt D., Krueger H. H. A. Properties of Piezoelectricity Ceramics // Technical Publication TP-226. – www.morgan-electroceramics.com

УДК 539.3

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СПУСКУ ТА ПІДЙОМУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ В КРИВОЛІНІЙНІЙ СВЕРДЛОВИНІ З ГЕОМЕТРИЧНИМИ НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ

Кандидат технічних наук Худолій С.М.

На основі співвідношень теорії гнучких криволінійних стрижнів поставлена задача про пружне згинання бурильної колони в каналі криволінійної свердловини. Запропоновано методику розв'язання. Досліджено чутливість сил опору переміщенню колони до додаткових геометричних відхилень осьової лінії свердловини.

The problem about elastic bending of a drill string in the channel of a curvilinear bore-hole is stated on the basis of the theory of flexible curvilinear rods. The techniques for its solving are proposed. The resistance force sensitivity to the drill string moving inside the bore-hole with additional geometrical imperfections of its axial line is analysed

Постановка проблеми. Створення криволінійних свердловин з великим віддаленням дозволяє не тільки здійснювати прицільне досягнення віддалених підземних вмістилищ нафти і газу, а й істотно підвищити дебет свердловини і повноту відбору палива. Так, для вертикальних свердловин вдається витягти всього лише до 37% обсягу палива, для криволінійних свердловин цей показник збільшується до 55%. Проте технології буріння криволінійних свердловин пов'язані з підвищеною аварійністю і число безаварійних пробурених в світі свердловин складає тільки 67% [1]. Тому проблема практичного впровадження технологій буріння глибоких свердловин різної просторової орієнтації пов'язана з необхідністю теоретичного моделювання механічних явищ, супутніх бурінню, з метою попередження аварійних режимів. При цьому найбільш цікавими є питання визначення зовнішніх та внутрішніх зусиль, що діють на БК та сприяють її прихвату в криволінійній свердловині при функціонуванні та операціях спуску і підйому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для глибоких свердловин з гладкою осьовою лінією, через їх велику довжину і порівняно малу кривизну, внутрішні пружні моменти в трубі БК, а також викликані

ними зовнішні розподілені контактні і фрикційні сили порівняно невеликі. Тому для визначення зовнішніх сил, що діють на елементи БК, можуть бути використані спрощені розрахункові схеми, що засновані на нехтуванні силами пружності та застосуванні теорії абсолютно гнучких ниток. В даний час проектування глибоких криволінійних свердловин здійснюється на базі такого підходу [1 — 2]. При бурінні криволінійних свердловин часто виникають ситуації, коли внаслідок різкого порушення однорідності тектонічної структури чи технології буріння траєкторія свердловини відхиляється від проектною і на ній виникають локальні геометричні недосконалості. У їх зоні БК піддається додатковому пружному згинанню, в результаті чого збільшуються розподілені сили контактної та фрикційної взаємодії і може настати аварійний ефект фрикційного прихвату колони (втрати рухливості БК відносно свердловини). Прогнозування цих ефектів за допомогою теорії абсолютно гнучких ниток неможливе. Практичне впровадження технології буріння свердловин складної просторової орієнтації вимагає відповідного математичного моделювання для проектування їх траєкторій і використання сучасних техніки і технології для їх прокладки. У даній роботі розглядаються питання комп'ютерного моделювання механічних явищ, що виникають при бурінні криволінійних свердловин. Запропоновано математичну модель, засновану на застосуванні теорії гнучких криволінійних стрижнів [3 — 5].

Мета роботи. Дослідити вплив геометричних спіральних недосконалостей свердловини на значення сил тертя які виникають під час руху в ній бурильної колони.

Основна частина. Наведемо основні співвідношення, що визначають геометрію осьової лінії свердловини. Прийнято, що в проектному стані осьові лінії свердловини і БК збігаються і являють собою частину дуги гіперболи в площині xOz з параметрами a, b та ексцентриситетом ε (рис. 1). Потім у геометрію осьової лінії свердловини вводиться локальне викривлення в формі спіралі з кроком λ і змінним радіусом $h(\vartheta) = h_c e^{-\alpha^2(\vartheta - \vartheta_c)^2}$, де h_c — найбільше значення радіусу; α — коефіцієнт при показнику експоненти (функції Гауса), що визначає швидкість спадання $h(\vartheta)$; ϑ_c — значення параметра з максимальним значенням $h(\vartheta_c) = h_c$. Рівняння осьової лінії БК в цьому випадку приводяться до виду

$$\begin{aligned} x &= \frac{a(1+\varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \cos \vartheta - h \cdot \cos(ks) \cdot \frac{b(\cos \vartheta + \varepsilon)}{\sqrt{a^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \vartheta + b^2(\cos \vartheta + \varepsilon)^2}}, \\ y &= h \cdot \sin(ks), \\ z &= \frac{b}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \sin \vartheta - h \cdot \cos(ks) \cdot \frac{a(1+\varepsilon) \sin \vartheta}{\sqrt{a^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \vartheta + b^2(\cos \vartheta + \varepsilon)^2}}; \end{aligned} \quad (1)$$

де $h = h_c \cdot e^{-\alpha^2 \left(\frac{s-s_c}{S}\right)^2}$, $s = \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\vartheta} \frac{\sqrt{a^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \theta + b^2(\cos \theta + \varepsilon)^2}}{(1+\varepsilon \cos \theta)^2} d\theta$ — параметр, що вимірюється довжиною осьової лінії від деякої початкової точки до поточної.

Ці рівності дозволяють підрахувати орти тригранника Френе, кривизну і кручення осьової лінії свердловини [5, 6].

Напружений стан кожного умовно виділеного елемента БК визначається головними векторами внутрішніх сил $\vec{F}(s)$ і моментів $\vec{M}(s)$ в перерізах БК і розподіленими векторами зовнішніх сил і моментів інтенсивністю $\vec{f}(s)$ і $\vec{m}(s)$. Сили \vec{f} включають в себе сили тяжіння $\vec{f}^{gr}(s)$, а також сили контактної взаємодії $\vec{f}^c(s)$ і сили тертя $\vec{f}^{fr}(s)$ між зовнішньою поверхнею труби БК і стінкою свердловини. Зовнішній розподілений момент $\vec{m}(s)$ складається тільки з моменту сил тертя $\vec{m}^{fr}(s)$.

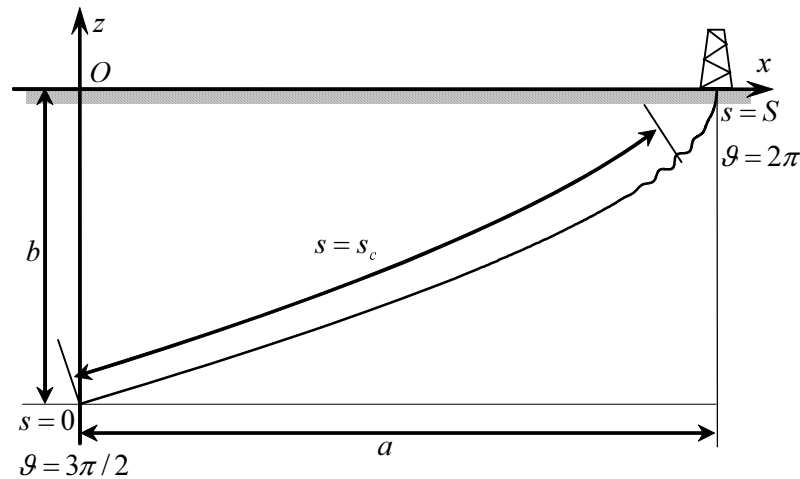


Рис. 1. Траєкторія свердловини з спіральними недосконаlostями.

Зовнішні та внутрішні сили і моменти що діють на елемент БК задовольняють рівнянням рівноваги [5]

$$\frac{\tilde{d}\vec{F}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{F} - \vec{f}, \quad \frac{\tilde{d}\vec{M}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{M} - \vec{\tau} \times \vec{F} - \vec{m}, \quad (2)$$

де значком \tilde{d} позначено локальне диференціювання, $\vec{\tau} = \frac{d\vec{\rho}}{ds}$, $\vec{n} = R \frac{d\vec{\tau}}{ds}$, $\vec{b} = \vec{\tau} \times \vec{n}$ — орти рухомого триєд-

ра Френе осьової лінії БК, $\vec{\omega}_\chi = k_R \vec{b} + \left(k_T + \frac{d\chi}{ds} \right) \vec{\tau}$ — вектор Дарбу [5, 6].

Щоб представити функції $\vec{F}(s)$, $\vec{M}(s)$ через деформації труби БК, введемо рухому систему осей (u, v, w) , вісь w якої спрямована вздовж орта $\vec{\tau}$, а осі u, v орієнтовані вздовж головних центральних осей інерції поперечного перерізу БК. Для круглого перерізу труби вони можуть бути обрані довільно орієнтованими в недеформованому стані БК.

Вектор $\vec{\omega}_\chi$ в системі координат (u, v, w) має компоненти p, q, r .

$$p = k_R \sin \chi, \quad q = k_R \cos \chi, \quad r = k_T + \frac{d\chi}{ds}, \quad (3)$$

де k_R — кривизна, k_T — кручення і χ — кут між ортом \vec{n} і віссю u [5, 6].

Будемо розглядати вектори \vec{F} , \vec{M} в системі осей (u, v, w) . При визначенні F_u, F_v, F_w прийемо [5], що осьова лінія трубчастого стрижня БК нерозтяжна. Тоді ці сили є чисто статичними чинниками і визначаються з умов рівноваги. Проекції M_u, M_v, M_w головного моменту \vec{M} за допомогою закону Гука представимо у вигляді

$$M_u = Ap, \quad M_v = Aq, \quad M_w = Cr. \quad (4)$$

Тут $A = EI$, $C = GI_w$ — жорсткості при згині і крученні; p, q, r — функції кривизни та кручення стрижня.

Рівняння (2) можна переписати у вигляді

$$\frac{dF_w}{ds} = k_R \cos \chi \cdot F_u - k_R \sin \chi \cdot F_v - f_w^{gr} - f_w^{fr}, \quad \frac{dr}{ds} = -\frac{m_w^{fr}}{C}, \quad \frac{d\chi}{ds} = r - k_T,$$

$$F_u = -A \frac{dk_R}{ds} \cos \chi - Ak_R k_T \sin \chi + Ck_R r \sin \chi, \quad F_v = A \frac{dk_R}{ds} \sin \chi - Ak_R k_T \cos \chi + Ck_R r \cos \chi,$$

$$f_u^c = A \frac{d}{ds} \left(\frac{dk_R}{ds} \right) \cos \chi - Ak_R k_T^2 \cos \chi + Ck_R k_T r \cos \chi + 2A \frac{dk_R}{ds} k_T \sin \chi +$$

$$+ Ak_R \frac{dk_T}{ds} \sin \chi - C \frac{dk_R}{ds} r \sin \chi + m_w^{fr} k_R \sin \chi - F_w k_R \cos \chi - f_u^{gr} \quad (5)$$

$$f_u^{gr} = -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \cos \chi + b_z \sin \chi), \quad f_v^{gr} = F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \sin \chi - b_z \cos \chi),$$

$$f_w^{gr} = -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g\tau_z$$

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

де $f^c = \sqrt{(f_u^c)^2 + (f_v^c)^2}$ — величина повної сили контактної взаємодії БК і стінки свердловини, \dot{w} — швидкість осьового руху БК, ω — кутова швидкість обертального руху БК, F — площа поперечного перетину БК, γ_{st} — густина матеріалу БК, γ_l — густина промивної рідини, μ — коефіцієнт тертя, d — зовнішній діаметр БК. Знаки « \pm » в двох останніх формулах (5) обираються в залежності від напрямків руху і обертання БК. У виразі для f_w^{fr} знак «-» відповідає процедурі підйому БК, знак «+» — її спуску і процесу буріння.

Для системи рівнянь (5) ставиться задача Коші. При цьому початкові умови для змінних F_w , M_w формулюються в залежності від механічного сенсу розглянутого технологічного процесу. Так, у разі моделювання процесу спуску можна вважати, що на нижньому кінці $s = 0$ задані величини $F_w(0) = 0$, $M_w(0) = 0$. Тоді в результаті інтегрування системи (5) від $s = 0$ до $s = S$ можна знайти силу $F_w(S)$ і момент $M_w(S)$ в точці підвісу БК $s = S$, необхідні для здійснення заданого режиму.

Інтегрування системи (5) здійснюється методом Рунге-Кутта. На кожному кроці його реалізації спочатку обчислюються функції $\chi(s_i)$, $r(s_i)$, $F_w(s_i)$, потім по їх знайденим значенням підраховуються інші невідомі $F_u(s_i)$, $F_v(s_i)$, $f_w^{fr}(s_i)$, $m_w^{fr}(s_i)$. Після цього робиться перехід до наступного кроку інтегрування.

Результати чисельного дослідження. За розробленою методикою виконано комп'ютерне моделювання пружного згинання БК в гіперболічній свердловині зі спіральними недосконалотями при наступних значеннях характерних параметрів: $a = 8000$ м, $b = 4000$ м, $\varepsilon = 1,5$ $d = 0.1683$ м, $\delta = 0.01$ м — товщина труби БК, $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ Па, $G = 0.8077 \cdot 10^{11}$ Па, $\gamma_{st} = 7850$ кг/м³, $\gamma_l = 1500$ кг/м³, $\mu = 0.2$,

$$\nu = \frac{\dot{w}}{\omega d / 2} = 100, \quad \lambda = 92,2 \text{ м}, \quad h_c = 5 \text{ м}.$$

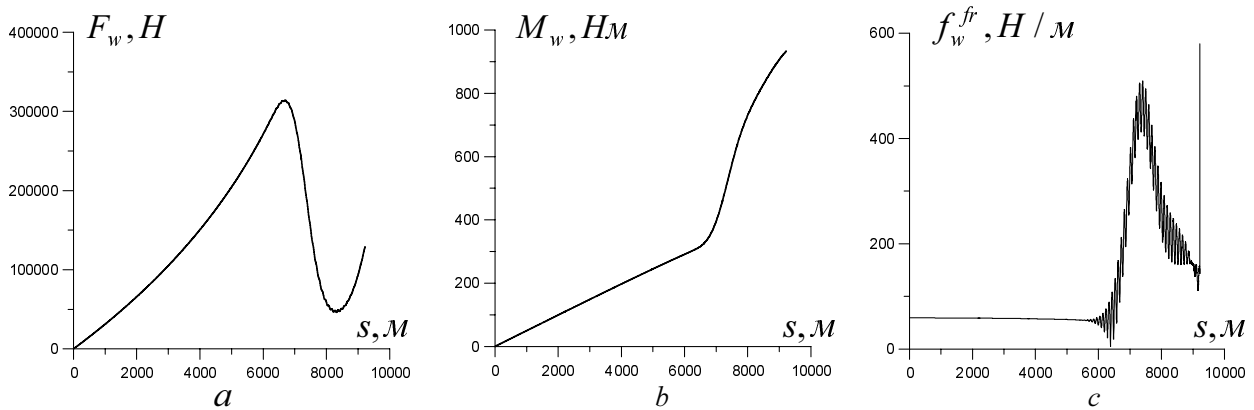


Рис. 2. Графіки сил та моментів що діють на БК в залежності від довжини осьової лінії. *a* – внутрішня поздовжня сила, *b* – внутрішній крутний момент, *c* – зовнішня розподілена сила тертя що перешкоджає поздовжньому руху БК.

Було прийнято, що центральна точка недосконалості відстоїть від початкової точки $s = 0$ на величину $s_c = 7S/8 = 8067$ м (рис. 1), де $S = 9220$ м — повна довжина осьової лінії БК.

На рис. 2 наведено графік зміни поздовжньої сили (а) та крутного моменту (b) по довжині БК. Можна бачити, що в місці розташування локалізованих спіральних недосконалостей є сплески цих функцій. На графіку зміни зовнішньої розподіленої поздовжньої сили тертя крім значних сплесків присутні ефекти осциляції цієї функції (рис. 2 c). З наявністю сплесків цих функцій пов'язане істотне збільшення сил тертя і їх моментів, що призводять до зростання осьової сили і крутного моменту, які необхідно прикласти до БК для забезпечення заданого режиму. Ці явища можуть стати причиною виникнення ефекту прихвата БК, в результаті чого вона повністю втратить свою рухливість в свердловині.

Висновки. Поставлено змішану задачу про пружне згинання бурильної колони всередині криволінійної свердловини при її осьовому русі і супутньому обертанні. Виведено рівняння що дозволяють моделювати процеси спуску та підйому БК довільної геометрії. Розглянуто випадок наявності на осьовій лінії свердловини локалізованих спіральних недосконалостей. Виконано аналіз операції спуску бурильної колони що обертається. Встановлено, що сили опору і їх моменти збільшуються зі збільшенням амплітуд недосконалостей, зменшенням їх кроків та зміщенням зон їх розташування від нижніх, найменш викривлених ділянок, до верхніх, найбільш викривлених.

Література

- 1 Гуляев В. І., 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 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.
- 3 Gulyayev V.I., Hudoly S.N., Glovach L.V. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections // International Journal of Solids and Structures. – 2011, Vol. 48, pp 110-118.
- 4 Gulyayev V.I., Khudoliy S.N., Andrusenko E.N. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes // Interaction and Multiscale Mechanics. – 2011, Vol. 4, pp 1-16.
- 5 Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Кошкин В.Л. Упругое деформирование, устойчивость и колебания гибких криволинейных стержней. – Киев: Наук. думка, 1992. – 344 с.
- 6 Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. – М.: Наука, 1974. – 180 с.