

УДК 539.3

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

МОДЕЛЮВАННЯ СИЛ ОПОРУ ПРИ ПІДЙОМІ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ В СВЕРДЛОВИНІ З НЕДОСКОНАЛОСТЯМИ У ФОРМІ ЗЛАМІВ ОСЬОВОЇ ЛІНІЇ

На основі теорії гнучких криволінійних стержнів поставлена задача про пружний згин бурильних колон в каналах глибоких криволінійних свердловин з геометричними недосконаlostями їх осьових ліній. Чисельними методами виконаний аналіз залежності сил опору руху колони від радіусів заокруглень, кутів, кроків і місць локалізації ламаних недосконалостей. Обговорюються результати розрахунків.

1. Вступ. При розробці шельфових родовищ нафти і газу найбільшого поширення набули три способи проходки свердловин. Перший спосіб мало залежить від глибини морського дна, під яким розташоване родовище, і його віддалення від лінії берега. Для реалізації цього способу використовуються спеціальні океанські судна і з його допомогою пробурена, наприклад, свердловина з глибини 3050 м океанського дна в Мексиканській затоці глибиною понад 4000 м в скельній породі під дном [5]. Менш трудомістким і більш поширеним є буріння свердловин з морських стаціонарних платформ, встановлених у шельфових акваторіях на порівняно невеликих глибинах. Очевидно, що ще більш простим є буріння з наземних установок.

Для двох останніх способів характерним є проходка криволінійних свердловин, що досягають родовища на деякому віддаленні від бурильних установок. Ці відстані вже перевищують 12000 м по горизонталі і плануються свердловини з вилученнями до 15000 м [5].

Важливо відзначити, що створення криволінійних свердловин з великим віддаленням дозволяє не тільки здійснювати прицільне досягнення віддалених підземних вмістищ 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, оскільки число безаварійних пробурених в світі свердловин складає тільки 67% [9], проблема практичного впровадження технологій буріння глибоких свердловин різної просторової орієнтації пов'язана з необхідністю теоретичного

моделювання механічних явищ, що супроводжують буріння, з метою попередження аварійних режимів.

Сучасний етап експлуатації більшості легкодоступних родовищ нафти, газу і газового конденсату в Україні характеризується завершальною стадією. У той же час великі запаси вуглеводневих палив виявлені в шельфових зонах Чорного та Азовського морів на глибинах 7 км і нижче. Враховуючи актуальність питань розробки технологій буріння глибоких криволінійних свердловин для енергетики України, можна зробити висновок, що проблема математичного моделювання механіки колон глибокого буріння у свердловинах різних обрисів становить важливу наукову і прикладну проблему.

Задачі дослідження згинальної стійкості вертикальних колон глибокого буріння розглянуті в публікаціях [3,4,6], стаття [2] присвячена аналізу їх згинальних і крутильних коливань, в роботах [8,9] досліджується механічна поведінка бурильної колони (БК) в криволінійних свердловинах на основі моделювання їх абсолютно гнучкими нитками, в [7] це питання вивчається з позицій формулювання прямих і обернених задач згинання криволінійного пружного стрижня. Огляди публікацій з цих проблем дано в [2,4].

У даній роботі поставлена задача про визначення сил опору, що перешкоджають руху бурильної колони (БК) в криволінійній свердловині з геометричними недосконаlostями її осьової лінії у формі локалізованих зламів. Аналізуються випадки, коли з-за наявності недосконалостей рухливість БК різко знижується і має місце ефект її замикання (прихоплення).

2. Постановка задачі про пружне згинання БК в криволінійній свердловині. Якщо рівняння осьової лінії свердловини задані в декартовій системі координат $Oxyz$

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

то за допомогою методики, викладеної в [1,2,7], можна підрахувати функції геометричних характеристик БК в деформованому стані. До них відносяться R – радіус кривини, T – радіус скруту, а також орти $\vec{t}$, $\vec{n}$, $\vec{b}$ рухомого триедра.

Якщо крива (1) визначена через деякий довільний параметр ϑ

$$x = x(\vartheta), \quad y = y(\vartheta), \quad z = z(\vartheta), \quad (2)$$

то замість похідної d/ds використовується похідна $d/Dd\vartheta$, де множник $D(\vartheta)$, що визначає довжину Δs елемента $\Delta\vartheta$, обчислюється так

$$D = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}. \quad (3)$$

Пружне деформування трубчастої БК в криволінійній свердловині в процесі буріння і виконання спуско-підйомних операцій здійснюється під дією розподілених сил ваги $\vec{f}^{gr}$, сил $\vec{f}^c$ контактної взаємодії між БК і стінкою свердловини, сил $\vec{f}^{fr}$ та моментів $\vec{m}^{fr}$ їх фрикційної взаємодії, а також зосереджених крайових сил і моментів, прикладених в точці підвісу БК і в точці її контакту з дном свердловини. У роботах [1,2,7] побудована система рівнянь, яка дозволяє визначати внутрішні сили і моменти, що виникають в БК при її русі, а також зовнішні сили контактної взаємодії, що впливають на сили опору руху. Тому внутрішню осьову силу F_w та крутний момент $M_w = Ch_2$, що виникають у кожному елементі БК, будемо знаходити за допомогою співвідношень [2]

$$\begin{aligned}
 \frac{dh_1}{d\vartheta} &= h_2, \quad \frac{dh_2}{d\vartheta} = -D \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{1}{D} \frac{dD}{d\vartheta} h_2 - \frac{D^2}{C} m_w^{fr}, \\
 \frac{dF_w}{d\vartheta} &= \frac{D}{R} \cos(h_1) \cdot F_u - \frac{D}{R} \sin(h_1) \cdot F_v - D \cdot f_w^{gr} - D \cdot f_w^{fr}, \\
 F_u &= -\frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cos(h_1) - \frac{A}{RT} \sin(h_1) + \frac{C}{R} \left(\frac{1}{T} + \frac{h_2}{D} \right) \sin(h_1), \\
 F_v &= \frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sin(h_1) - \frac{A}{RT} \cos(h_1) + \frac{C}{R} \left(\frac{1}{T} + \frac{h_2}{D} \right) \cos(h_1), \\
 f_w^{fr} &= \pm \mu \cdot \sqrt{(f_u^c)^2 + (f_v^c)^2} \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}, \\
 m_w^{fr} &= \pm \mu \cdot \sqrt{(f_u^c)^2 + (f_v^c)^2} \frac{\omega d^2 / 4}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}, \\
 f_u^c &= -\frac{C \cdot h_2}{D^2} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sin(h_1) - \frac{1}{R} \cos(h_1) \cdot F_w - \frac{A-C}{RT^2} \cos(h_1) + \frac{C \cdot h_2}{DRT} \cos(h_1) + \\
 &+ \frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left[\frac{d}{Dd\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \right] \cos(h_1) + \frac{A}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sin(h_1) + \frac{A}{RD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{T} \right) \sin(h_1) + \\
 &+ \frac{A-C}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \sin(h_1) + \frac{\sin(h_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) \cos(h_1) + \frac{1}{R} \sin(h_1) \cdot F_w + \frac{A-C}{RT^2} \sin(h_1) - \frac{C \cdot h_2}{DRT} \sin(h_1) - \\
 &- \frac{A}{D} \frac{d}{d\vartheta} \left[\frac{d}{Dd\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \right] \sin(h_1) + \frac{A}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cos(h_1) + \frac{A}{RD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{T} \right) \cos(h_1) + \\
 &+ \frac{A-C}{TD} \frac{d}{d\vartheta} \left(\frac{1}{R} \right) \cos(h_1) + \frac{\cos(h_1)}{R} m_w^{fr} - f_v^{gr},
 \end{aligned} \tag{4}$$

які наводимо без виведення.

Компоненти f_u^{gr} , f_v^{gr} , f_w^{gr} розподілених сил ваги, що входять до цієї системи рівнянь, відомі і визначаються так

$$\begin{aligned} f_u^{gr} &= -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \cos(h_1) + b_z \sin(h_1)), \\ f_v^{gr} &= F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \sin(h_1) - b_z \cos(h_1)), \\ f_w^{gr} &= -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g\tau_z, \end{aligned} \quad (5)$$

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

Шукані змінні системи (4) підраховуються чисельно. Для інтегрування перших трьох рівнянь системи (4) 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.

3. Аналіз згинання БК у свердловині з ламаними геометричними недосконаlostями. При бурінні криволінійних свердловин часто виникають ситуації, коли внаслідок різкого порушення однорідності тектонічної структури або технології буріння траєкторія свердловини відхиляється від проектної, і на ній виникають локальні геометричні недосконаlostі. Зазвичай вони мають вигляд збурення у формі тривимірної спіралі, плоскої гармоніки або місцевого згладженого плоского або просторового зламу. У даній роботі розглянуто випадок недосконаlostей у формі зламів, розташованих у площині кривизни осьової лінії свердловини. Прийнято, що в проектному стані осьова лінія свердловини являє собою частину гіперболи з вершиною в точці $(L; 0)$, та цілком лежить у площині xOz

$$x = \frac{L(1+\varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \cos \vartheta, \quad y = 0, \quad z = \frac{H}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \sin \vartheta \quad (3\pi/2 \leq \vartheta \leq 2\pi). \quad (6)$$

Для цієї геометрії вирішується поставлена вище задача про визначення внутрішніх і зовнішніх силових факторів, що діють на БК при її русі. Потім в геометрію осьової лінії свердловини вводяться спотворення в формі локалізованих зламів зі згладженими кутами. Злами такого роду можуть бути апроксимовані шляхом накладення вершин гіпербол з різними ексцентриситетами і різними значеннями кутів між їх асимптотами (рис. 1).

Якщо асимптоти лівих гілок двох подібних гіпербол з різними знаками розташовані вздовж від'ємного напрямку осі Ox (рис.1, *a* і *б*), то їх комбінація з невеликим зсувом Δs в площині xOz дасть злами на прямолінійній лінії з невеликим зсувом Δz і радіусом кривини R_h у вершині (рис. 1, *в*).

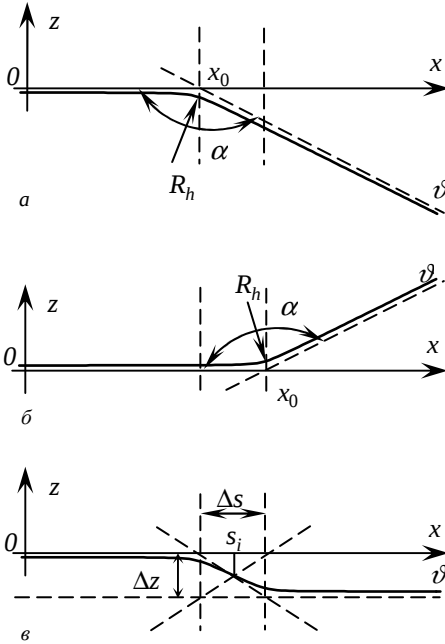


Рис. 1. Моделювання локальних зламів траєкторії свердловини

Якщо накласти цю лінію на початкову траєкторію в чотирьох місцях, як зазначено у формулі (6), то кінцева траєкторія БК досягне конфігурації, показаної на рис. 2.

Аналітичні вирази для гіперболи, зображеної на рис. 1, *a*, записуються у вигляді

$$z = - \left\{ \frac{\operatorname{tg} \alpha (x - x_0)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\operatorname{tg} \alpha (x - x_0)}{2} \right]^2 - \epsilon} \right\}, \quad (7)$$

де α – кут між асимптотами гіперболи, x_0 – абсциса вершини гіперболи, ϵ – її ексцентриситет.

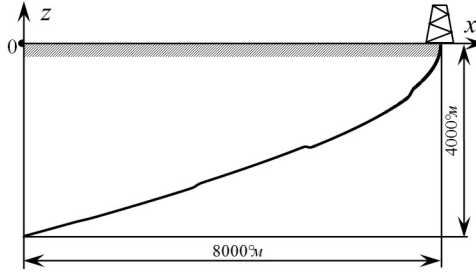


Рис. 2. Траєкторія свердловини з ламаними недосконаlostями

Рівняння гіперболи, представленої на рис. 1,б, записується у вигляді

$$z = \left\{ \frac{\operatorname{tg} \alpha (x - x_0)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\operatorname{tg} \alpha (x - x_0)}{2} \right]^2 - \varepsilon} \right\}. \quad (8)$$

Злами осової лінії свердловини можуть бути також тривимірними, тоді їх геометрія може бути представлена наступним чином:

$$y = \pm \left\{ \frac{\operatorname{tg} \alpha (x - x_0)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\operatorname{tg} \alpha (x - x_0)}{2} \right]^2 - \varepsilon} \right\}. \quad (9)$$

У загальному випадку, плоскі і тривимірні недосконалості можуть бути розташовані в кількох місцях і мати різні кути і радіуси закруглення. Тоді їх геометричне моделювання може бути виконане накладенням на початкову траєкторію (6) різних зламів, які задаються формулами (7), (8) або (9).

За допомогою виразів для осової лінії свердловини підраховуються радіуси кривини та скруту. Потім за формулою (3) обчислюється його метричний множник D , що дозволяє перейти до природної параметризації кривої (2), підрахувати орти $\vec{n}$, $\vec{b}$, $\vec{\tau}$ тригранника Френе і перейти до інтегрування системи (4). Усі ці змінні описуються громіздкими виразами і тут не наводяться.

При виконанні спуско-підйомних операцій із заданим відношенням $v = 2\dot{w}/\omega d$ (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 (5).

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 (4), а потім за такою ж схемою продовжувати розв'язок системи на наступних кроках до точки $\vartheta = 2\pi$. Крок інтегрування $\Delta\vartheta$ вибирається з умови збіжності обчислень. Якщо розглядається режим буріння, то на краю

$\vartheta = 3\pi/2$ змінним h_1, h_2, F_w присвоюються відомі, відмінні від нуля, значення і загальний алгоритм розв'язку зберігається.

За розробленою методикою виконано комп'ютерне моделювання пружного згинання БК в гіперболічній свердловині з ламаними недосконаlostями при наступних значеннях характерних параметрів: $L = 8000 \text{ м}$, $H = 4000 \text{ м}$, $d = 0,1683 \text{ м}$, $\delta = 0,01 \text{ м}$ - товщина труби БК, $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $G = 0,8077 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\gamma_{st} = 7850 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_l = 1500 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,2$, $\nu = 100$.

Центри зламів s_i розташовані в точках $s_1 = S/8$, $s_2 = 3S/8$, $s_3 = 5S/8$, $s_4 = 7S/8$, а вершини суміжних гіпербол знаходяться в точках $s_i \pm 50 \text{ м}$.

Повна довжина БК S обчислюється за формулою

$$S = \int_{3\pi/2}^{2\pi} D(\vartheta) d\vartheta = 9220 \text{ м}.$$

Розглянуто операцію підйому БК. Деякі результати наведено на рис. 3 та 4.

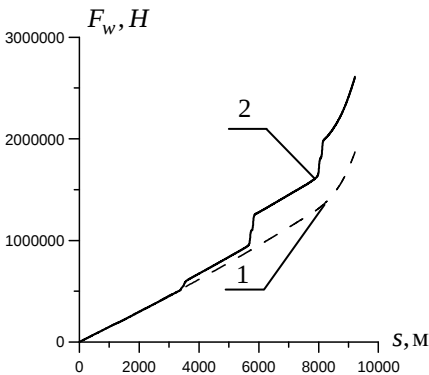


Рис.3. Графіки зміни поздовжньої сили $F_w(s)$ для ідеальної свердловини (крива 1) та свердловини з недосконаlostями (крива 2)

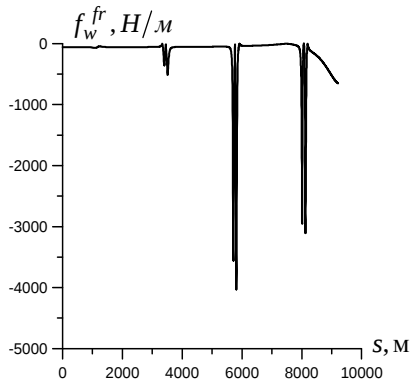


Рис.4. Графіки зміни розподіленої сили $f_w^{fr}(s)$ тertia $f_w^{fr}(s)$

На рис. 3 зображені функції поздовжніх сил $F_w(s)$ для свердловин, осові лінії яких мають ідеальну геометрію (крива 1) і містять злами (крива 2). Можна бачити, що якщо свердловина не має геометричних недосконаlostей, то функція $F_w(s)$ є гладкою і має порівняно малі

значення. Однак введення навіть незначних недосконалостей стає причиною виникнення розривів обрису функції.

Рисунок 4 ілюструє характер зміни сили тертя по довжині колони при виконанні операції підйому БК. Можна бачити, що вона має ділянки різних стрибків у зонах зламів осевої лінії свердловини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Гайдайчук В.В., Худолій С.М. І.Л., Андрусенко О.М.* Про рухомість бурильної колони в криволінійній свердловині зі спіральними геометричними недосконалостями // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2010. – № 85. – С.74 – 85.
2. *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.
3. *Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Горбунович И.В.* Квазистатические бифуркационные состояния вертикальных колонн сверхглубокого бурения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. - №5. – С. 57 – 65.
4. *Мислюк М. А., Рибчик І. Й., Яремчук Р.С.* Буріння свердловин. Т. 3. Вертикальне та скероване буріння. – Київ: Інтерпрес Лтд., 2004. – 294 с.
5. *Akgun F.* A finite element model for analyzing horizontal well BHA behavior // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2004. – V. 42, No. 2 – 4. – P. 121 – 132.
6. *Gulyayev V.I., Gaidaichuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V.* The buckling of elongated rotating drill strings // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2009. – V. 67. – P. 140 – 148.
7. *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. – V. 48. – P. 110 – 118.
8. *Iyoho A.W., Meize R.A., Millheim K.K.* Lessons from integrated analysis of GOM drilling performance// SPE Drilling and Completion. – 2005. – March. – P. 6 – 16.
9. *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.

Стаття надійшла до редакції 08.02.2011 р.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ПОДЪЁМЕ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В СКВАЖИНЕ С НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ В ФОРМЕ ИЗЛОМОВ ОСЕВОЙ ЛИНИИ

На основе теории гибких криволинейных стержней поставлена задача об упругом изгибании бурильных колонн в каналах глубоких криволинейных скважин с геометрическими несовершенствами их осевых линий. Численными методами выполнен анализ зависимости сил сопротивления движению колонны от радиусов закругленности, углов, шагов и мест локализации ломаных несовершенств. Обсуждаются результаты расчётов.

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

SIMULATION OF RESISTANCE FORCES AT ASCENDING DRILL STRINGS IN BORE-HOLES WITH BREAK IMPERFECTIONS

On the basis of the theory of curvilinear flexible rods the problem of elastic bending of drill strings in curvilinear bore-holes with geometric imperfections is stated. Numerical analysis of resistance force dependence on types of the imperfections, their steps, curvatures and angles is performed. The calculation results are discussed.