

УДК 539.3

Компьютерное моделирование операции спуска буровой колонны в криволинейной скважине с локальными спиральными несовершенствами

Худолий С. Н., к.т.н.

Национальный транспортный университет,
ООО «Украинский институт стальных конструкций имени В.Н. Шимановского»,
Украина

Аннотация. На основе соотношений теории гибких криволинейных стержней поставлена задача об упругом изгибании буровой колонны в канале криволинейной скважины. Предложена методика решения. Исследуется чувствительность сил сопротивления перемещению колонны к дополнительным геометрическим искажениям осевой линии скважины.

Анотація. На основі співвідношень теорії гнучких криволінійних стрижнів поставлено задачу про пружне згинання бурової колони в каналі криволінійної свердловини. Запропоновано методику розв'язання. Досліджується чутливість сил опору переміщенню колони до додаткових геометричних спотворень осевої лінії свердловини.

Abstract. 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.

Ключевые слова. Буровая колонна, криволинейная скважина, геометрические несовершенства, силы сопротивления, чувствительность.

Введение. Создание криволинейных наклонно-направленных и горизонтальных скважин с большим удалением от буровой установки, а также проходка боковых стволов, ответвляющихся от существующих вертикальных скважин, позволяет не только осуществлять прицельное достижение удаленных подземных месторождений нефти и газа, но и существенно повысить дебет скважины и полноту отбора топлива. Так, для вертикальных скважин удается извлечь всего лишь до 37% объема топлива, для криволинейных скважин этот показатель увеличивается до 55%. Однако технологии бурения криволинейных скважин связаны с повышенной аварийностью и число безаварийных пробуренных в мире скважин составляет только 67% [1]. Поэтому проблема практического внедрения технологий бурения глубоких скважин различной пространственной ориентации сопряжена с необходимостью теоретического моделирования механических явлений, сопутствующих бурению, с целью предупреждения аварийных режимов.

Для глубоких скважин с гладкой осевой линией, в силу их большой длины и сравнительно малой кривизны, внутренние упругие моменты в трубе БК, а также вызванные ими внешние распределенные контактные и фрикционные силы сравнительно невелики. Поэтому для определения внешних сил, действующих на элементы БК, могут быть использованы упрощенные расчетные схемы, основанные на пренебрежении силами упругости и применении теории абсолютно гибких нитей. В настоящее время проектирование глубоких криволинейных скважин осуществляется на базе такого подхода [1–2].

При бурении криволинейных скважин часто возникают ситуации, когда вследствие резкого нарушения однородности тектонической структуры или технологии бурения траектория скважины отклоняется от проектной, и на ней возникают локальные геометрические несовершенства. В их зоне БК подвергается дополнительному упругому изгибанию, в результате чего увеличиваются распределенные силы контактного и фрикционного взаимодействия, и может наступить аварийный эффект фрикционного прихвата колонны (утраты подвижности БК относительно скважины). Прогнозирование этих эффектов с помощью теории абсолютно гибких нитей невозможно.

Практическое внедрение технологии бурения скважин сложной пространственной ориентации требуют соответствующего математического моделирования для проектирования их траекторий и использования современной техники и технологии для их прокладки. При этом наибольший интерес представляют вопросы определения внешних и внутренних сил, действующих на БК и способствующих ее прихвату в криволинейной скважине в процессах ее спуска, подъема и функционирования. В данной работе рассматриваются вопросы компьютерного моделирования механических явлений, возникающих при бурении криволинейных скважин. Предложена математическая модель, основанная на применении теории гибких криволинейных стержней [3–5].

Постановка задачи об упругом изгибании бурильной колонны в канале криволинейной скважины. Пусть БК находится в канале криволинейной скважины, осевая линия которой в декартовой прямоугольной системе координат $Oxyz$ определяется радиус-вектором

$$\vec{\rho} = \vec{\rho}(s), \quad (1)$$

где $\vec{\rho} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты системы $Oxyz$; s – параметр, измеряемый длиной осевой линии от некоторой начальной точки до текущей. Примем, что осевые линии БК и скважины совпадают.

Рассмотрим явление изгиба БК при ее движении в канале скважины в процессе бурения или выполнения спуско-подъемных операций. Будем считать, что радиусы кривизны R и кручения T кривой (1) настолько велики по сравнению с диаметром БК, что ее деформирование происходит в упругой стадии.

Напряженное состояние каждого условно выделенного элемента БК определяется главными векторами внутренних сил $\vec{F}(s)$ и моментов $\vec{M}(s)$ в сечениях БК и распределенными векторами внешних сил и моментов интенсивностью $\vec{f}(s)$ и $\vec{m}(s)$. Силы \vec{f} включают в себя силы тяжести $\vec{f}^{gr}(s)$, а также силы контактного взаимодействия $\vec{f}^c(s)$ и силы трения $\vec{f}^{fr}(s)$ между наружной поверхностью трубы БК и стенкой скважины. Внешний распределенный момент $\vec{m}(s)$ состоит только из момента сил трения $\vec{m}^{fr}(s)$. В связи с этим можно записать:

$$\vec{f} = \vec{f}^{gr} + \vec{f}^c + \vec{f}^{fr}, \quad \vec{m} = \vec{m}^{fr}. \quad (2)$$

Чтобы представить функции $\vec{F}(s)$, $\vec{M}(s)$ через деформации трубы БК, введем орты $\vec{\tau}$, \vec{n} , \vec{b} подвижного триэдра осевой линии БК [5]:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{\rho}}{ds}, \quad \vec{n} = R \frac{d\vec{\tau}}{ds}, \quad \vec{b} = \vec{\tau} \times \vec{n}. \quad (3)$$

Используем также подвижную систему осей (u, v, w) , ось w которой направлена вдоль орта $\vec{\tau}$, а оси u, v ориентированы вдоль главных центральных осей инерции поперечного сечения БК.

Будем рассматривать векторы \vec{F} , \vec{M} в системе осей (u, v, w) . При определении F_u , F_v , F_w примем [5], что осевая линия трубчатого стержня БК нерастяжима. Тогда эти силы являются чисто статическими факторами и определяются из условий равновесия. Проекции M_u , M_v , M_w главного момента \vec{M} с помощью закона Гука представим в виде:

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

Здесь $A = EI$, $C = GI_w$ – жесткости при изгибе и кручении; p , q , r – функции кривизны и кручения стержня.

Величины p , q , r выражаются через кривизну k_R , кручение k_T и угол χ между ортом \vec{n} и осью u [5, 6]:

$$p = k_R \sin \chi, \quad q = k_R \cos \chi, \quad r = k_T + \frac{d\chi}{ds}. \quad (5)$$

Действующие на элемент БК внешние и внутренние силы и моменты удовлетворяют уравнениям равновесия [2]:

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

В связи с тем, что составляющие (4) момента \vec{M} выражены в системе осей (u, v, w) , поворачивающейся с изменением S , удобно векторные уравнения (7) также записывать в этой системе. Тогда полные производные $d\vec{F}/ds$, $d\vec{M}/ds$ можно представить в виде:

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

где значком \tilde{d} обозначена операция локального дифференцирования, $\vec{\omega}_\chi$ – вектор Дарбу, вычисляемый по формуле:

$$\vec{\omega}_\chi = k_R \vec{b} + \left(k_T + \frac{d\chi}{ds} \right) \vec{\tau}.$$

Этот вектор в системе координат (u, v, w) имеет компоненты p, q, r .

С учетом (8) представим уравнения (7) в виде:

$$\frac{\tilde{d}\vec{F}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{F} - \vec{f}, \quad \frac{\tilde{d}\vec{M}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{M} - \vec{\tau} \times \vec{F} - \vec{m}. \quad (9)$$

Обычно при решении прикладных задач для криволинейного стержня со сложным очертанием осевой линии трудно подобрать переменную S , параметризующую его геометрию, и вместо S приходится выбирать

некоторый безразмерный параметр \mathcal{G} . Тогда в вышеприведенных формулах можно перейти к новой переменной \mathcal{G} с помощью равенства $ds = Dd\mathcal{G}$, где D – метрический множитель, вычисляемый по формуле:

$$D = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2},$$

точкой над буквой обозначено дифференцирование по \mathcal{G} .

Используя формулы (4) и (5), уравнения (9) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dF_u}{ds} &= r \cdot F_v - k_R \cos \chi \cdot F_w - f_u^{gr} - f_u^c, \\ \frac{dF_v}{ds} &= k_R \sin \chi \cdot F_w - r \cdot F_u - f_v^{gr} - f_v^c, \\ \frac{dF_w}{ds} &= k_R \cos \chi \cdot F_u - k_R \sin \chi \cdot F_v - f_w^{gr} - f_w^{fr}; \quad (10) \\ F_u &= -A \frac{dk_R}{ds} \cos \chi - Ak_R k_T \sin \chi + Ck_R r \sin \chi \\ F_v &= A \frac{dk_R}{ds} \sin \chi - Ak_R k_T \cos \chi + Ck_R r \cos \chi \\ \frac{dr}{ds} &= -\frac{m_w^{fr}}{C}. \end{aligned}$$

Эту систему дополним уравнением, которое можно получить из формулы (5):

$$\frac{d\chi}{ds} = r - k_T. \quad (11)$$

Продифференцируем по s обе части четвертого и пятого уравнений системы (10), после чего приравняем их правые части правым частям двух первых равенств этой системы, получим выражения для компонент внешней распределенной силы контактного взаимодействия:

$$\begin{aligned}
 f_u^c &= A \frac{d}{ds} \left(\frac{dk_R}{ds} \right) \cos \chi - Ak_R k_T^2 \cos \chi + Ck_R k_T r \cos \chi + 2A \frac{dk_R}{ds} k_T \sin \chi + \\
 &+ Ak_R \frac{dk_T}{ds} \sin \chi - C \frac{dk_R}{ds} r \sin \chi + m_w^{fr} k_R \sin \chi - F_w k_R \cos \chi - f_u^{gr}, \\
 f_v^c &= -A \frac{d}{ds} \left(\frac{dk_R}{ds} \right) \sin \chi + Ak_R k_T^2 \sin \chi - Ck_R k_T r \sin \chi + 2A \frac{dk_R}{ds} k_T \cos \chi + \\
 &+ Ak_R \frac{dk_T}{ds} \cos \chi - C \frac{dk_R}{ds} r \cos \chi + m_w^{fr} k_R \cos \chi + F_w k_R \sin \chi - f_v^{gr}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Входящие сюда компоненты f_u^{gr} , f_v^{gr} , f_w^{gr} распределенных сил тяжести известны и определяются так:

$$\begin{aligned}
 f_u^{gr} &= -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \cos \chi + b_z \sin \chi) \\
 f_v^{gr} &= F(\gamma_{st} - \gamma_l)g(n_z \sin \chi - b_z \cos \chi) \\
 f_w^{gr} &= -F(\gamma_{st} - \gamma_l)g\tau_z,
 \end{aligned} \tag{13}$$

где F – площадь поперечного сечения трубы БК, γ_{st} – плотность материала трубы, γ_l – плотность промывочной жидкости.

Тогда величина полной силы контактного взаимодействия БК и стенки скважины подсчитывается по формуле $f^c = \sqrt{(f_u^c)^2 + (f_v^c)^2}$.

Будем считать, что при бурении и выполнении спуско-подъемных операций БК одновременно совершает осевое движение со скоростью w и вращается с угловой скоростью ω . Тогда полную силу трения $f^{fr} = \mu \cdot f^c$ можно разложить на две взаимно перпендикулярные составляющие:

$$\begin{aligned}
 f_w^{fr} &= \pm \mu \cdot f^c \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}, \\
 f_\omega^{fr} &= \pm \mu \cdot f^c \frac{\omega d}{2\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}
 \end{aligned} \tag{14}$$

которые пропорциональны соответствующим компонентам скоростей \dot{w} и $\omega d / 2$. Здесь μ – коэффициент трения, d – наружный диаметр трубы

БК. Первая из этих сил препятствует осевому движению БК, вторая направлена в окружном направлении и приводит к возникновению распределенного момента сил трения:

$$m_w^{fr} = f_w^{fr} \cdot \frac{d}{2} = \pm \mu \cdot f^c \frac{\omega d^2}{4\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d/2)^2}}. \quad (15)$$

Знаки « \pm » в формулах (14), (15) выбираются в зависимости от направлений движения и вращения БК. В выражении для f_w^{fr} знак « \rightarrow » соответствует процедуре подъема БК, знак « $+$ » – ее спуску и процессу бурения.

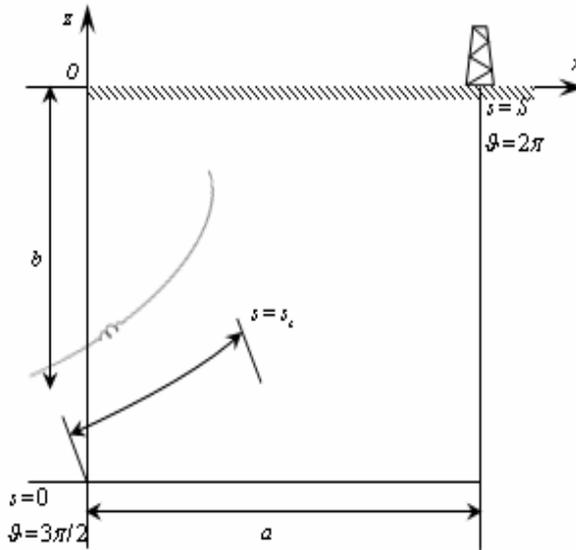


Рис. 1. Геометрическая схема криволинейной скважины с несовершенствами осевой линии

Геометрическое моделирование локализованных несовершенств.

Приведем основные соотношения, определяющие геометрию осевой линии скважины. Принято, что в проектном состоянии осевые линии скважины и БК совпадают и представляют собой часть дуги гиперболы с полуосями a , b в плоскости xOz (рис. 1). Затем в геометрию осевой линии скважины вводится локальное искажение в форме спирали с шагом λ и переменным радиусом $h(\vartheta) = h_c e^{-\alpha^2(\vartheta - \vartheta_c)^2}$, где h_c – наибольшее

значение радиуса h ; α – коэффициент при показателе экспоненты (функции Гаусса), определяющий скорость убывания $h(\vartheta)$; ϑ_c – значение параметра ϑ с максимальным значением $h(\vartheta) = h_c$. Уравнения осевой линии БК в этом случае приводятся к виду:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a(1+\varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \cos \vartheta - h \cdot \cos(ks) \cdot \frac{b(\cos \vartheta + \varepsilon)}{\sqrt{a^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \vartheta + b^2(\cos \vartheta + \varepsilon)^2}}, \\ y &= h \cdot \sin(ks), \\ z &= \frac{b}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \sin \vartheta - h \cdot \cos(ks) \cdot \frac{a(1+\varepsilon) \sin \vartheta}{\sqrt{a^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \vartheta + b^2(\cos \vartheta + \varepsilon)^2}}; \end{aligned} \quad (16)$$

где $h = h_s \cdot e^{-\alpha^2 \left(\frac{s-s_c}{S}\right)^2}$, $s = \int_{\frac{3\pi}{2}}^{\vartheta} \frac{\sqrt{a^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \theta + b^2(\cos \theta + \varepsilon)^2}}{(1+\varepsilon \cos \theta)^2} d\theta$.

Эти равенства позволяют подсчитать орты трехгранника Френе, кривизну и кручение [5, 6].

Для системы уравнений (10)–(15) ставится задача Коши. При этом начальные условия для переменных F_w , M_w формулируются в зависимости от механического смысла рассматриваемого технологического процесса. Так, в случае моделирования процесса выполнения операций спуска можно считать, что на нижнем конце $s = 0$ заданы величины $F_w(0) = 0$, $M_w(0) = 0$. Тогда в результате интегрирования системы (10) от $s = 0$ до $s = S$ можно найти силу $F_w(S)$ и момент $M_w(S)$ в точке подвеса БК $s = S$, необходимые для осуществления заданного режима.

Интегрирование системы (10)–(15) осуществляется методом Рунге-Кутты. На каждом шаге его реализации вначале вычисляются функции $\chi(s_i)$, $r(s_i)$, $F_w(s_i)$, затем по их найденным значениям подсчитываются остальные неизвестные $F_u(s_i)$, $F_v(s_i)$, $f_w^{fr}(s_i)$, $m_w^{fr}(s_i)$. После этого делается переход к следующему шагу интегрирования.

Результаты численного исследования. По разработанной методике выполнено компьютерное моделирование упругого изгиба БК в гиперболической скважине со спиральными несовершенствами при следующих значениях характерных параметров: $a = 8000\text{м}$, $b = 4000\text{м}$,

$d = 0.1683\text{ м}$, $\delta = 0.01\text{ м}$ – толщина трубы БК, $E = 2.1 \cdot 10^{11}\text{ Па}$,
 $G = 0.8077 \cdot 10^{11}\text{ Па}$, $\gamma_{st} = 7850\text{ кг/м}^3$, $\gamma_l = 1500\text{ кг/м}^3$, $\mu = 0.2$, $\nu = \frac{w}{\omega d / 2} = 100$,
 $\lambda = 92.2\text{ м}$, $h_c = 5\text{ м}$.

Было принято, что центральная точка несовершенства отстоит от начальной точки $s = 0$ на величину $s_c = 3S/8 = 3457\text{ м}$ (рис. 1), где $S = 9220\text{ м}$ – полная длина осевой линии БК.

На рис. 2 приведен график изменения перерезывающей силы $F_u(s)$. Можно видеть, что в месте расположения локализованных спиральных несовершенств имеются осцилляции этой функции с существенной амплитудой. Эти же эффекты присутствуют на графиках изменения внешних распределенных продольных сил трения f_w^{fr} и момента сил трения m_w^{fr} (рис. 3 а, б). С наличием всплесков этих функций связано существенное увеличение сил трения и их моментов, приводящих к возрастанию осевой силы $F_w(s)$ и крутящего момента $M_w(s)$ в БК. Они могут стать причиной возникновения эффекта прихвата БК, в результате чего она полностью потеряет свою подвижность в скважине.

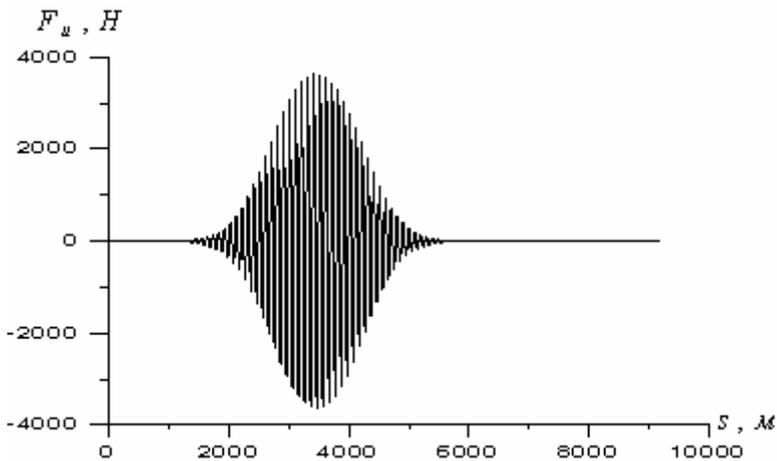


Рис. 2. График изменения перерезывающей силы $F_u(s)$ при изгибании БК в скважине

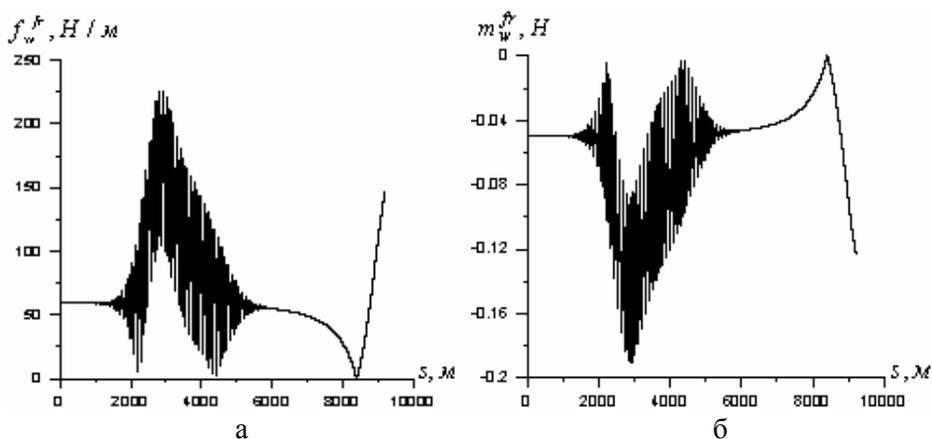


Рис. 3. Графики изменения внешних распределенных продольных сил трения

f_w^{fr} (а) и момента сил трения m_w^{fr} (б) при изгибании БК в скважине

Выводы. Поставлена смешанная задача об упругом изгибании буровой колонны в криволинейной скважине при ее осевом движении и сопутствующем вращении. Рассмотрен случай наличия на осевой линии скважины локализованных спиральных несовершенств. Выполнен анализ операции спуска вращающейся буровой колонны. Установлено, что силы сопротивления и их моменты увеличиваются с увеличением амплитуд несовершенств, уменьшением их шагов и смещением зон их расположения от нижних, наименее искривленных участков, к верхним, наиболее искривленным участкам.

Литература

- [1] Гуляев В. И. Сучасні методи теоретичного моделювання стану бурової колони у похило-скерованих свердловинах / В. І. Гуляев, В. В. Гайдайчук, С. М. Худолій, Л. В. Гловач // Нафтова та газова промисловість. – 2009. – №1. – С. 26–30.
- [2] Sawaryn S. J. A compendium of directional calculations based on the minimum curvature method / S. J. Sawaryn, J. L. Thorogood // SPE Drilling and Completion. – 2005. – March. – P. 24–36.
- [3] Gulyayev V. I. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections / V. I. Gulyayev, S. N. Hudoly, L. V. Glovach // International Journal of Solids and Structures. – 2011. – Vol. 48. – P. 110–118.
- [4] Gulyayev V. I. Sensitivity of resistance forces to localized geometrical imperfections in movement of drill strings in inclined bore-holes / V. I.

- Gulyayev, S. N. Khudoliy, E. N. Andrusenko // Interaction and Multiscale Mechanics. – 2011. – Vol. 4. – P. 1–16.
- [5] Гуляев В. И. Упругое деформирование, устойчивость и колебания гибких криволинейных стержней / В. И. Гуляев, В. В. Гайдайчук, В. Л. Кошкин. – К. : Наукова думка, 1992. – 344 с.
- [6] Погорелов А. В. Дифференциальная геометрия / А. В. Погорелов. – М. : Наука, 1974. – 180 с.

Надійшла до редколегії 22.07.2011 р.