

В. И. Гуляев<sup>1</sup>, П. З. Луговой<sup>2</sup>, Е. Н. Андрусенко<sup>1</sup>

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОГО ИЗГИБА БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В СВЕРХГЛУБОКОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ СКВАЖИНЕ

<sup>1</sup>Национальный транспортный университет,  
ул. Суворова, 1, 01010, Киев, Украина; e-mail: valery@gulyayev.com.ua

<sup>2</sup>Институт механики им. С. П. Тимошенко НАНУ,  
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: plugovyy@inmech.kiev.ua

**Abstract.** Basing on the theory of flexible curvilinear rods, the problem is stated on an elastic deformation of a drill-strings in the channels of ultra-deep slopping directed wells. The well is assumed to have the geometrical imperfections of its axis line in the form of localized spirals. A dependence of resistance of drill strings motion forces on amplitudes, steps, and places of localization of geometrical imperfections are analyzed numerically. The numerical findings are analyzed.

**Key words:** drill string, horizontal bore-hole, spiral imperfections, descending-ascending operations, resistance forces.

#### Введение.

Для развития мирового топливно-энергетического комплекса последние десятилетия характерны широким внедрением целого ряда новейших технологий, особое место среди которых занимает высокоэффективная система разработки газонефтяных залежей с помощью горизонтальных скважин. Применение этой технологии позволяет существенно увеличить объёмы и скорость добычи извлекаемых запасов и уменьшить её себестоимость. Проводка направленных и горизонтальных скважин является целесообразной для извлечения углеводородных топлив в шельфовых зонах морских акваторий. Она эффективна также при разработке месторождений с низкой и анизотропной проницаемостью пластов, связанной с наличием вертикальных трещин, имеющих ориентацию, перпендикулярную проектируемой оси скважины.

Однако наибольшие перспективы развития и внедрения технологий бурения горизонтальных скважин связывают с быстрым ростом добычи сланцевого газа. Поскольку природный газ содержится в сланцевых породах в небольших количествах, рентабельность его добычи может быть достигнута только за счёт охвата сеткой трубных коллекторов больших площадей месторождения. Реализация этого эффекта становится возможной, вследствие совмещения приёмов горизонтального бурения и гидроразрыва сланцевого пласта.

Наиболее полное развитие эта технология получила в США [4]. На ее основе американские газовые компании сумели увеличить долю сланцевого газа в общем объёме горючего газа до 15% и достичь его избыточности на внутреннем рынке. В связи с этим в настоящее время в мире происходит быстрое перераспределение спроса и предложений на углеводородные топлива, а проблеме разработки инновационных технологий их добычи уделяется всё большее внимание. Определённые перспективы добычи шельфового и сланцевого газа имеются и в Украине [3]. Однако в значительной мере эффективность созданных технологий понижается из-за того, что при проходке наклонно-направленных и горизонтальных скважин аварийность процессов бурения остаётся довольно высокой и превышает 30%. Это обусловлено тем, что многие механические и физические эффекты, сопровождающие операции криволинейного бурения, имеют довольно сложную природу и до конца не поняты.

Успешность операции бурения в первую очередь зависит от конструкции буровой колонны (БК) и режима бурения [2]. Поэтому при проектировании криволинейных скважин большое внимание должно отводиться вопросам их компьютерного моделирования. Колонна буровых труб представляет собой сложную пространственную систему с распределёнными параметрами. В общем случае её нельзя считать жёстким стержнем, поскольку отношение её длины к диаметру может достигать значения  $10^6$  и по условиям геометрического подобия её можно отнести к абсолютно гибкой нити. Однако в зависимости от действующих на неё осевой силы и крутящего момента и условий контактного взаимодействия со стенкой скважины в ней могут локально протекать механические явления, типичные для упругих стержней. Они могут терять устойчивость и выпучивать, принимать форму цилиндрической спирали [13, 21, 22], совершать изгибные, крутильные и продольные колебания [8, 12, 14, 18, 23]. Если БК расположена в полости криволинейной скважины, то она дополнительно подвергается воздействию контактных и фрикционных сил, а также сил инерции промысловой жидкости, которая циркулирует внутри и снаружи БК под действием избыточного давления, создаваемого гидронасосами [6, 7, 9 – 11, 24, 25]. Эти силы нелинейно зависят от кривизны осевой линии скважины и быстро возрастают с её увеличением. С этой точки зрения наиболее опасными являются локальные геометрические несовершенства осевой линии скважины, которые могут иметь формы синусоидальных [17] и спиральных [15] возмущений, а также сглаженных изломов [16]. Как показано в отмеченных статьях на примерах скважин с боковым отклонением, равным 8000 м, даже малые локализованные несовершенства могут привести к значительному увеличению сил сопротивления перемещению колонны и сделать невыполнимыми основные технологические операции бурения.

В данной работе изучены явления формирования сил сопротивления в режимах выполнения операций спуска и подъёма БК в скважинах с боковым отклонением до 12000 м, исследовано влияние локальных спиральных несовершенств в зависимости от мест их расположения.

### §1. Основные соотношения теории упругого изгиба стержня в криволинейном канале.

Процесс проходки нефтяных и газовых скважин состоит из трёх основных технологических операций, отличающихся механическими приёмами и схемами силовых воздействий на БК. Наиболее сложной является операция бурения, связанная с совмещением осевого движения и вращения БК, действием на долото осевой силы и крутящего момента (момента резания), а также сил инерции потоков промысловой жидкости. Довольно ответственными являются спуско-подъёмные операции, выполняемые обычно для замены затупившегося долота и другого оборудования. Может случиться, что в связи с перераспределением по отношению к операции бурения действующих сил тяжести, контактного взаимодействия и трения спуско-подъёмные операции окажутся невыполнимыми. Поэтому теоретическое моделирование механических явлений, сопутствующих их проведению, должно проводиться специально.

Исследуем упругое изгибание БК в скважинах, проектное очертание которых описывается гиперболической кривой (рис. 1)

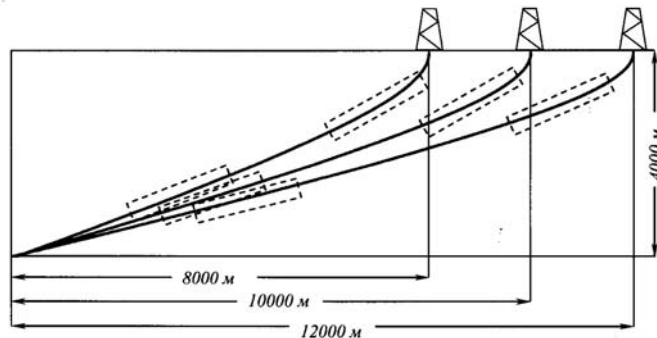


Рис. 1

$$x = \frac{L(1+\varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \cos \vartheta; \quad y = 0; \quad z = \frac{H}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \sin \vartheta. \quad (1)$$

Здесь  $L$  – удаление по горизонтали нижнего конца скважины от бурильной установки;  $H$  – глубина скважины;  $\varepsilon$  – параметр, определяющий эксцентриситет гиперболы;  $\vartheta$  – скалярный параметр.

При проведении расчётов наряду с параметризацией (1) удобно также использовать натуральную параметризацию, задаваемую параметром  $s$ , равным длине дуги осевой линии БК, измеряемой от некоторой начальной точки. Связь между параметрами  $\vartheta$  и  $s$  задаётся интегральной зависимостью

$$s = \int_{3\pi/2}^{\vartheta} D(\theta) \cdot d\theta,$$

где  $D(\vartheta)$  – метрический множитель, равный

$$D(\vartheta) = \frac{\sqrt{L^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \vartheta + H^2(\cos \vartheta + \varepsilon)^2}}{(1+\varepsilon \cos \vartheta)^2}. \quad (2)$$

Иногда удобно параметры  $\vartheta$  и  $s$  использовать одновременно.

Примем, что в процессе бурения в силу ряда причин технологического характера осевая линия скважины приобрела дополнительные искривления в форме локализованных спиралей, наложенных на исходную осевую линию (1).

Шаг спиралей  $\lambda = 2\pi/k$  определяется волновым числом  $k$  и является постоянным, радиус  $a(s)$  имеет максимальное значение  $a_c$  в некоторой точке  $s = s_c$  и убывает по закону функции Гаусса

$$a(s) = a_c \cdot e^{-\alpha^2 \left( \frac{s-s_c}{S} \right)^2}. \quad (3)$$

Здесь  $s_c$  – расстояние от начальной точки  $s = 0$  ( $\vartheta = 3\pi/2$ ) до центральной точки несовершенства;  $S$  – полная длина осевой линии скважины;  $\alpha$  – коэффициент, определяющий представительный диапазон изменения  $a(s)$ , вне которого величиной  $a(s)$  можно пренебречь.

Тогда составляющие радиуса-вектора  $\vec{r}$  осевой линии скважины с локализованными спиральными несовершенствами можно подсчитать по формулам

$$x = \frac{L(1+\varepsilon)}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \cos \vartheta - a(s) \cdot \cos(ks) \cdot \frac{H(\cos \vartheta + \varepsilon)}{\sqrt{L^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \vartheta + H^2(\cos \vartheta + \varepsilon)^2}};$$

$$y = a(s) \cdot \sin(ks); \quad (4)$$

$$z = \frac{H}{1+\varepsilon \cos \vartheta} \cdot \sin \vartheta - a(s) \cdot \cos(ks) \cdot \frac{L(1+\varepsilon) \sin \vartheta}{\sqrt{L^2(1+\varepsilon)^2 \sin^2 \vartheta + H^2(\cos \vartheta + \varepsilon)^2}}.$$

При расчёте упругого изгибания БК в полости скважины принимаем, что их осевые линии совпадают. Это позволяет, используя равенства (3), (4), построить орты  $\vec{\tau}$ ,  $\vec{n}$ ,  $\vec{b}$  подвижного трёхгранника Френе [5]

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{r}}{ds}; \quad \vec{n} = R \frac{d^2\vec{r}}{ds^2}; \quad \vec{b} = \vec{\tau} \times \vec{n},$$

а также подсчитать кривизну

$$k_R = \frac{1}{R} = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{ds^2}\right)^2}$$

и кручение

$$k_T = \frac{d\vec{r}}{ds} \left( \frac{d^2\vec{r}}{ds^2} \times \frac{d^3\vec{r}}{ds^3} \right) \Big/ \frac{d^2\vec{r}}{ds^2} \cdot \frac{d^2\vec{r}}{ds^2}.$$

Векторы внутренних сил  $\vec{F}(s)$  и моментов  $\vec{M}(s)$  удобно задавать в системе осей  $(u, v, w)$ , связанной с поперечным сечением трубы БК так, что ось  $w$  коллинеарна с ортом  $\vec{\tau}$ , а оси  $u$ ,  $v$  являются главными осями инерции сечения стержня. Тогда уравнения равновесия элемента трубы БК под действием внешних распределённых сил  $\vec{f}$  и моментов  $\vec{m}$  можно сформулировать в форме [1]

$$\frac{d\vec{F}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{F} - \vec{f}; \quad \frac{d\vec{M}}{ds} = -\vec{\omega}_\chi \times \vec{M} - \vec{\tau} \times \vec{F} - \vec{m}. \quad (5)$$

Здесь  $\vec{\omega}_\chi$  – вектор угловой скорости вращения системы осей  $(u, v, w)$  при движении её начала с единичной скоростью вдоль осевой линии БК. Он имеет вид

$$\vec{\omega}_\chi = k_R \vec{b} + \left( k_T + \frac{d\chi}{ds} \right) \vec{\tau}. \quad (6)$$

Входящая сюда искомая величина  $\chi$  равна углу между ортом  $\vec{n}$  и осью  $u$ . Для её описания удобно ввести обозначения  $\chi = h_1$ ,  $d\chi/ds = h_2$ . Распределённые силы  $\vec{f}$  и моменты  $\vec{m}$ , под действием которых происходит изгибание БК, определяются равенствами

$$\vec{f}(s) = \vec{f}^{gr}(s) + \vec{f}^c(s) + \vec{f}^{fr}(s); \quad \vec{m}(s) = \vec{m}^{fr}(s), \quad (7)$$

где  $\vec{f}^{gr}(s)$  – силы тяжести;  $\vec{f}^c(s)$  – силы контактного взаимодействия буровой колонны со стенкой скважины;  $\vec{f}^{fr}(s)$  – силы трения;  $\vec{m}^{fr}(s)$  – моменты сил трения.

Функции  $\vec{f}^{fr}(s)$ ,  $\vec{m}^{fr}(s)$  определяются из условия, что при выполнении спуско-подъёмных операций БК одновременно совершает осевое движение со скоростью  $\dot{w}$  и вращается с угловой скоростью  $\omega$ . Для этого режима движения фрикционные воздействия вычисляются по формулам [15 – 20]

$$f_w^{fr} = \pm \mu \cdot f^c \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}; \quad m_w^{fr} = \pm \mu \cdot f^c \frac{\omega d}{2\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}. \quad (8)$$

В этих равенствах  $\mu$  – коэффициент трения;  $d$  – наружный диаметр трубы а знаки « $\pm$ » выбираются в зависимости от направления движения и вращения БК. В выражении для  $f_w^{fr}$  знак « $-$ » соответствует операции подъёма БК, знак « $+$ » – её спуску и бурению. Для моделирования контактного и фрикционного взаимодействия БК со стенкой скважины в работе [16] с использованием соотношений (5) – (8) построена система разрешающих уравнений

$$\frac{dh_1}{d\vartheta} = h_2; \quad \frac{dh_2}{d\vartheta} = \frac{dD}{Dd\vartheta} h_2 - D \frac{dk_T}{d\vartheta} - \frac{D^2}{C} m_w^{fr};$$

$$\begin{aligned}
\frac{dF_w}{d\vartheta} &= D \cdot k_R \cosh_1 \cdot F_u - D \cdot k_R \sinh_1 \cdot F_v - D \cdot f_w^{gr} - D \cdot f_w^{fr}; \\
F_u &= (C - A) k_R k_T \sinh_1 + C k_R \frac{h_2}{D} \sinh_1 - \frac{A}{D} \frac{dk_R}{d\vartheta} \cosh_1; \\
F_v &= (C - A) k_R k_T \cosh_1 + C k_R \frac{h_2}{D} \cosh_1 + \frac{A}{D} \frac{dk_R}{d\vartheta} \sinh_1; \\
f_w^{fr} &= \pm \mu \cdot \sqrt{(f_u^c)^2 + (f_v^c)^2} \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}; \\
m_w^{fr} &= \pm \mu \cdot \sqrt{(f_u^c)^2 + (f_v^c)^2} \frac{\omega d^2 / 4}{\sqrt{\dot{w}^2 + (\omega d / 2)^2}}; \\
f_u^c &= m_w^{fr} k_R \sinh_1 + 2 A k_T \frac{dk_R}{D d\vartheta} \sinh_1 - C k_T \frac{dk_R}{D d\vartheta} \sinh_1 - \frac{C h_2}{D^2} \cdot \frac{dk_R}{d\vartheta} \sinh_1 + \\
&+ A k_R \frac{dk_T}{D d\vartheta} \sinh_1 - F_w k_R \cosh_1 + C k_R k_T^2 \cosh_1 - A k_R k_T^2 \cosh_1 + C k_R k_T \frac{h_2}{D} \cosh_1 + \\
&+ A \frac{d}{D d\vartheta} \left( \frac{dk_R}{D d\vartheta} \right) \cosh_1 - f_u^{gr}; \\
f_v^c &= m_w^{fr} k_R \cosh_1 + 2 A k_T \frac{dk_R}{D d\vartheta} \cosh_1 - C k_T \frac{dk_R}{D d\vartheta} \cosh_1 - \frac{C h_2}{D^2} \cdot \frac{dk_R}{d\vartheta} \cosh_1 + \\
&+ A k_R \frac{dk_T}{D d\vartheta} \cosh_1 + F_w k_R \sinh_1 - C k_R k_T^2 \sinh_1 + A k_R k_T^2 \sinh_1 - C k_R k_T \frac{h_2}{D} \sinh_1 - \\
&- A \frac{d}{D d\vartheta} \left( \frac{dk_R}{D d\vartheta} \right) \sinh_1 - f_v^{gr}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Для первых трёх уравнений этой системы начальные условия известны. При выполнении операций спуска и подъёма они имеют вид уравнений свободного края

$$F_w(0) = 0; \quad M_w(0) = 0. \tag{10}$$

Из второго условия этой системы имеем

$$h_1(0) = 0; \quad h_2(0) = 0. \tag{11}$$

Условия (10), (11) позволяют сформулировать задачу Коши для первых трёх уравнений системы (9) и решать её методом Рунге – Кутты. При этом остальные равенства этой системы используются для вычисления оставшихся искоемых переменных  $F_u(\vartheta)$ ,  $F_v(\vartheta)$ ,  $f_w^{fr}(\vartheta)$ ,  $m_w^{fr}(\vartheta)$ ,  $f_u^c(\vartheta)$ ,  $f_v^c(\vartheta)$  на каждом шаге интегрирования.

## §2. Исходные данные задачи.

При проектировании геометрии криволинейной скважины и технологии её проходки необходимо учитывать большое число различных факторов, характеризующих глубину скважины  $H$  (более 4км), наибольшее удаление  $L$  (более 12км) долота от буровой установки, диаметр  $d$  трубы БК (до 0,4м), материал трубы (сталь, титан, алюминий, композит), коэффициент трения ( $\mu = 0,2 - 0,3$ ), отношение  $\nu$  между скоростями осевого движения БК и окружного движения наружных точек её трубы.

В данных исследованиях упругого изгибания БК в скважинах с гиперболическими траекториями рассмотрены случаи, когда их геометрия является идеальной и задаётся в области  $3\pi/2 \leq \vartheta \leq 2\pi$  уравнениями (1) при  $H = 4000\text{м}$ ,  $L = 8000, 10000, 12000\text{м}$  и  $\varepsilon = 3$  (рис. 1), а также когда в серединах первой ( $s_c = S/8$ ) или четвертой ( $s_c = 7S/8$ ) четвертей их длины  $S$  образовались спиральные несовершенства с шагом  $\lambda = 91\text{м}$  и наибольшей амплитудой  $a_c = 2\text{м}$ . Заметим, что для выбранных геометрических соотношений на рис. 1 спиральные несовершенства визуально не различимы. Поэтому на рис. 2 они представлены в увеличенном масштабе.

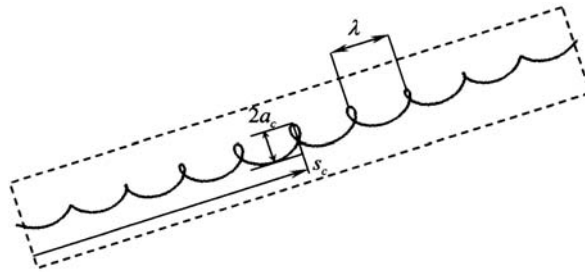


Рис. 2

Значения остальных параметров приняты равными:  $d = 0,1683\text{м}$ , толщина стенки трубы  $\delta = 0,01\text{м}$ ;  $E = 2,1 \cdot 10^{11}\text{Па}$ ;  $G = 0,8077 \cdot 10^{11}\text{Па}$ ; плотность материала трубы  $\gamma_{st} = 7850\text{кг/м}^3$ ; плотность промывочной жидкости  $\gamma_l = 1500\text{кг/м}^3$ ;  $\mu = 0,2$ ;  $\nu = 0,01$ ; 1; 100.

## §3. Анализ влияния спиральных несовершенств на выполнение спуско-подъёмных операций.

**3.1. Моделирование операции спуска БК.** С помощью описанного подхода выполнено моделирование двух операций – спуска и подъёма БК. В результате вычислений получены все функции, определяемые соотношениями (9). В табл. 1 приведены наиболее характерные интегральные величины, определяющие значения продольной силы  $F_w$  и крутящего момента  $M_w$  в точке подвеса  $s = S$  опускаемой БК, а также

полного упругого удлинения  $\Delta S = \frac{1}{EF} \int_{3\pi/2}^{2\pi} F_w(\vartheta) D d\vartheta$  и полного угла закручивания

$\varphi(S) = \frac{1}{GI_w} \int_{3\pi/2}^{2\pi} M_w D d\vartheta$  при  $\nu = 1$ . Рассмотрены случаи отсутствия несовершенств и

расположения их центральных точек в сечениях  $s = (3S/8; 7S/8)$  для скважин с горизонтальными отклонениями  $L = 8000, 10000$  и  $12000$  м. В таблице даны также значения  $S$  полных длин БК и полной силы тяжести  $P = F(\gamma_t - \gamma_l)S$ , найденной с учётом действия выталкивающей силы промывочной жидкости.

Из приведённых результатов следует, что сила  $F_w(S)$ , с которой нужно удерживать БК в точке её подвеса, уменьшается с увеличением длины  $S$  БК и введением несовершенств в геометрию осевой линии скважины. Первая особенность обусловле-

на тем, что сила  $F_w(S)$  определяется, в первую очередь, глубиной  $H$  скважины и при отсутствии сил трения между БК и стенкой скважины вообще не зависит от  $L$ .

Поэтому, если учитывать контактное взаимодействие, то с увеличением  $L$  при постоянном  $H$  вертикальная составляющая силы тяжести остаётся неизменной, в то время как силы трения, направленные вдоль осевой линии, возрастают на участках траектории, приближающихся к горизонтальным. Этим объясняется характер изменения  $F_w(S)$  в табл. 1. При этом в большей степени указанный эффект проявляется, когда несовершенства локализируются в наиболее искривленной, верхней, части скважины (см. табл. 1;  $NN$  (позиции) 3, 6, 9).

Таблица 1

$L, S, P$	$N$	$s_c, \text{ м}$	$F_w(S), \text{ МН}$	$\Delta S, \text{ м}$	$M_w(S), \text{ кНм}$	$\Delta\varphi(S), \text{ рад}$
$L = 8000\text{м}$ $S = 9113\text{м}$ $P = 2,82\text{МН}$	1	–	0,850	3,101	32,6	54,6
	2	$3S/8 = 3417$	0,663	1,968	48,5	94,3
	3	$7S/8 = 7973$	0,290	2,334	79,8	81,8
$L = 10000\text{м}$ $S = 10943\text{м}$ $P = 3,39\text{МН}$	4	–	0,764	3,177	39,9	81,4
	5	$3S/8 = 4103$	0,600	1,977	53,7	123,6
	6	$7S/8 = 9574$	0,252	2,323	83,1	111,9
$L = 12000\text{м}$ $S = 12820\text{м}$ $P = 3,97\text{МН}$	7	–	0,680	3,116	46,9	114,1
	8	$3S/8 = 4807$	0,542	1,929	58,6	156,0
	9	$7S/8 = 11217$	0,226	2,222	85,2	146,1

Как оказалось, практически не зависит от  $L$  удлинение  $\Delta S$  колонны, хотя внесённые несовершенства существенно влияют на его величину. В тоже время крутящий момент  $M_w(S)$  и угол упругого закручивания  $\varphi(S)$  заметно возрастают как с увеличением  $L$ , так и с внесением несовершенств.

Особенности изменения величин  $F_w$  и  $M_w$  вдоль длины  $s$  для случая  $L = 12000\text{м}$  можно проследить на рис. 3, 4. На них номера кривых 1, 2, 3 соответствуют позициям (см. табл. 1;  $NN$  (позиции) 7, 8, 9).

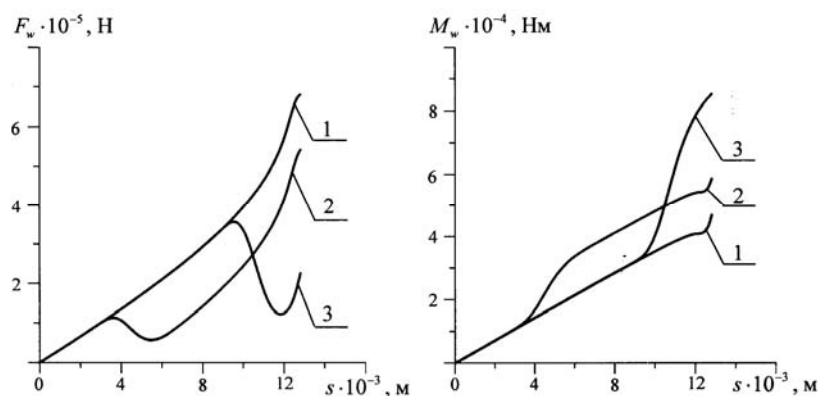


Рис. 3

Рис. 4

Анализ представленных результатов позволяет заключить, что в скважине с идеальной геометрией функция продольной силы  $F_w(s)$  монотонно возрастает с увеличением  $s$  (кривая 1 на рис. 3). Однако при подходе к зонам локализации несовер-

шенств эти функции достигают локального максимума и начинают быстро убывать, достигая локальных минимумов (кривые 2, 3). Затем эти кривые снова возрастают.

Иная тенденция имеет место для функции крутящего момента  $M_w(s)$  (рис. 4). Здесь при выбранном значении  $\nu = 1$  все кривые 1 – 3 имеют вид возрастающих функций, причём наиболее быстро они возрастают на участках, содержащих несовершенства.

Моделирование операции спуска БК с другими отношениями  $\nu$  скорости  $\dot{w}$  осевого движения БК к скорости  $\omega d / 2$  окружного движения точек её наружной поверхности показало, что с уменьшением  $\nu$  до величины 0,01 значения  $F_w(s)$  уменьшились примерно вдвое, а функции  $M_w(s)$ , наоборот, возросли примерно вдвое. Увеличение  $\nu$  до 100 привело к обратному эффекту, примерно двукратному увеличению  $F_w(s)$  и такому же уменьшению  $M_w(s)$ . Обнаруженный эффект даёт возможность управлять режимом спуска БК и подбирать наиболее рациональные соотношения между его кинематическими и силовыми характеристиками, обеспечивающие меньшие затраты энергии и снижающие уровни напряжений и деформаций в трубах БК.

**3.2. Моделирование операции подъёма БК.** Выполнение операции подъёма БК связано с необходимостью приложения в точке подвеса БК осевой силы  $F_w(s)$ , которая может преодолеть действие сил гравитации  $\vec{f}^{gr}(s)$ , и сил трения  $\vec{f}^{fr}(s)$ . Поэтому эта операция может оказаться более энергозатратной по сравнению с операциями спуска и бурения. В табл. 2 и на рис. 6 – 10 приведены результаты моделирования основных внешних и внутренних силовых факторов, сопутствующих подъёму БК в скважинах с величиной удаления  $L = 8000, 10000$  и  $12000$  м при  $\nu = 1$ . Сравнение соответствующих числовых значений в табл. 1 и 2 приводит к выводу, что операция подъёма оказывается намного более чувствительной к рассмотренным геометрическим несовершенствам. Так, в случае  $L = 12000$  м введение несовершенств приводит к более, чем десятикратному увеличению  $F_w(s)$  и тридцатикратному увеличению  $M_w(s)$  (ср.  $N = 7$  и  $9$  в табл. 2). Существенно больших значений достигают также величины  $\Delta S$  и  $\Delta \varphi$ .

Таблица 2

$L, S, P$	$N$	$s_c, \text{ м}$	$F_w(s), \text{ МН}$	$\Delta S, \text{ м}$	$M_w(s), \text{ кНм}$	$\Delta \varphi(s), \text{ рад}$
$L = 8000 \text{ м}$ $S = 9113 \text{ м}$ $P = 2,82 \text{ МН}$	1	–	1,703	6,24	38,9	54,2
	2	$3S/8 = 3417$	5,182	21,76	331,7	593,7
	3	$7S/8 = 7973$	9,511	12,68	696,0	278,1
$L = 10000 \text{ м}$ $S = 10943 \text{ м}$ $P = 3,39 \text{ МН}$	4	–	1,815	7,86	48,3	80,8
	5	$3S/8 = 4103$	7,584	38,02	533,7	1129,5
	6	$7S/8 = 9574$	14,781	19,80	1139,3	495,7
$L = 12000 \text{ м}$ $S = 12820 \text{ м}$ $P = 3,97 \text{ МН}$	7	–	1,926	9,67	57,6	113,0
	8	$3S/8 = 4807$	11,452	66,79	859,2	2099,0
	9	$7S/8 = 11217$	23,200	31,15	1847,6	859,9

Проследить за характером зависимости силы  $F_w(s)$  и момента  $M_w(s)$  от независимой переменной  $s$  можно на рис. 5 и 6. Кривые 1 – 3 на них соответствуют  $N = 7, 8, 9$  в табл. 2. Как видно, на участках, свободных от несовершенств, эти функции изменяются медленно, однако при приближении к зонам, включающим геометрические искажения, они резко возрастают.



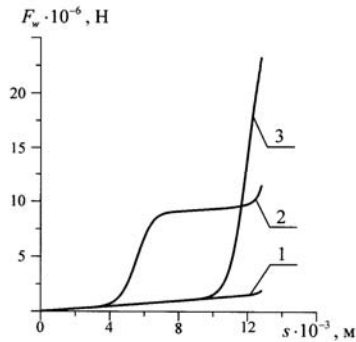


Рис. 5

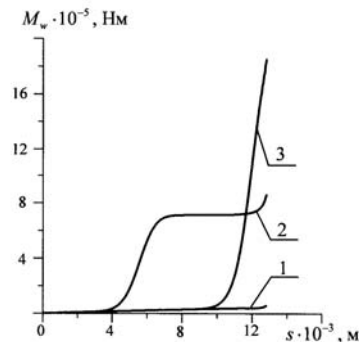


Рис. 6

В зонах расположения несовершенств существенно возрастает и результирующая перерезывающая сила  $F_R(s)$  (рис. 7), подсчитываемая по формуле  $F_R = \sqrt{F_u^2 + F_v^2}$ .

Указанные особенности изменения внутренних сил и моментов обусловлены, в основном, резким возрастанием в зонах несовершенств распределённых осевых сил трения  $f_w^{fr}(s)$  (рис. 8) и крутящих моментов сил трения  $m_w^{fr}(s)$  (рис. 9). Эти функции имеют тенденцию к росту также при приближении к точке подвеса  $\vartheta = 2\pi$ , в окрестности которой кривизна также быстро увеличивается.

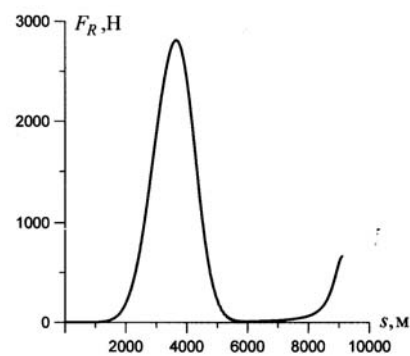


Рис. 7

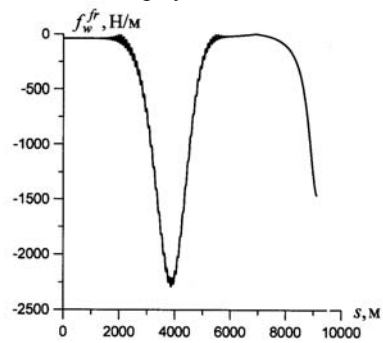


Рис. 8

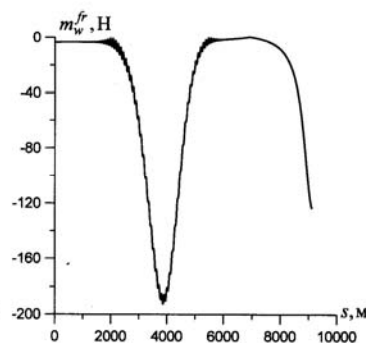


Рис. 9

**Выводы.**

На основе теории гибких криволинейных стержней поставлена задача об упругом изгибании буровой колонны при её спуске и подъёме в криволинейной скважине с геометрическими несовершенствами в форме локализованных трёхмерных спиралей переменного радиуса.

Проведено компьютерное моделирование упругого деформирования буровых колонн при выполнении операций спуска и подъёма в скважинах с гиперболическими осевыми линиями для различных случаев удаления по горизонтали долота от буровой установки и расположения несовершенств по длине скважины.

Установлено, что добавление рассмотренных спиральных несовершенств в геометрию осевой линии скважины может приводить к более, чем десятикратному увеличению сил и моментов сопротивления движению БК и быть причиной возникновения нештатных ситуаций в некоторых технологических операциях бурения.

РЕЗЮМЕ. На основі теорії гнучких криволінійних стержнів поставлено задачу про пружне деформування бурильних колон в каналах глибоких похило-скерованих свердловин з геометричними недоскональностями їх осевих ліній в формі локалізованих спіралей. Чисельними методами виконано аналіз залежності сил опору руху колони від амплітуд, кроків і місць локалізації геометричних недоскональностей. Проаналізовано результати комп'ютерного моделювання.

1. Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Кошкин В.Л. Упругое деформирование, устойчивость и колебания гибких криволинейных стержней. – К.: Наук. думка, 1992. – 343 с.
2. Мислюк М.А., Рибичч І.Й., Яремійчук Р.С. Буріння свердловин. Т. 3. Вертикальне та скероване буріння. – К.: Інтерпрес Лтд., 2004. – 294 с.
3. Михайлов В.А., Зейкан О.Ю., Гладун В.В., Чепіль П.М., Крупський Ю.З., Куровець І.М. Перспективи газоносності сланцевих відкладів України // Нафтова і газова промисловість. – 2011. – № 3. – С. 42 – 45.
4. Осінчук З.П. Газовий ринок США: зріджений чи сланцевий газ? // Нафтова і газова промисловість. – 2011. – № 3. – С. 61 – 62.
5. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. – М.: Наука, 1974. – 176 с.
6. Aadnoy B.S., Larsen K., Berg P.C. Analysis of stuck pipe in deviated boreholes // J. Petrol. Sci. Eng. – 2003. – 37. – P. 195 – 212.
7. Aadnoy B.S., Andersen K. Design of oil wells using analytical friction models // J. Petroleum Sci. Eng. – 2001. – 32. – P. 53 – 71.
8. Barsegyan V.P., Movsisyan L.A. Optimal Control of the Vibration of Elastic Systems Described by the Wave Equation // Int. Appl. Mech. – 2012. – 48, N 2. – P. 234 – 240.
9. Brett J.F., Beckett A.D., Holt C.A., Smith D.L. Uses and limitations of drillstring tension and torque models for monitoring hole conditions // SPE Drill. Eng. – 1989. – 4. – P. 223 – 229.
10. Choe J., Schubert J. J., Juvkam-Wold H. C. Well-control analyses on extended-reach and multilateral trajectories // SPE Drill. and Compl. – 2005. – June. – P. 101 – 108.
11. Cunha J.C. Buckling of tubulars inside wellbores: a review on recent theoretical and experimental works // SPE Drill. and Compl. – 2004. – 19, N 1. – P. 13 – 19.
12. Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells // J. Petrol. Sci. Eng. – 2011. – 78. – P. 759 – 764.
13. Gulyayev V.I., Gaidachuk V.V., Solovjov I.L., Gorbunovich I.V. The buckling of elongated rotating drill strings // J. Petrol. Sci. Eng. – 2009. – 67. – P. 140 – 148.
14. Gulyayev V.I., Glushakova O.V., Hudoliy S.N. Quantized attractors in wave models of torsion vibrations of deep-hole drill strings // Mech. Solids. – 2010. – 45, N 2. – P. 264 – 274.
15. Gulyayev V.I., Hudoly S.N., Glovach L.V. The computer simulation of drill column dragging in inclined bore-holes with geometrical imperfections // Int. J. Solids and Struct. – 2011. – 48. – P. 110 – 118.
16. 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 // Interact. Multiscale Mech. – 2011. – 4, N 1. – P. 1 – 16.
17. Gulyayev V.I., Lugovoy P.Z., Andrusenko O.M. Simulation of the Effects of Drill String Sticking in Curvilinear Bore-Holes with Geometric Imperfections // Int. Appl. Mech. – 2010. – 46, N 12. – P. 88 – 99.
18. Gulyayev V.I., Lugovoy P.Z., Borshch E.I. Self-Excited Vibration of a Drill String Bit // Int. Appl. Mech. – 2013. – 49, N 3. – P. 350 – 359.
19. Gulyayev V.I., Lugovoi P.Z., Khudoliy S.N., Glovach L.V. Theoretical Identification of Resistance Forces to the Longitudinal Displacement of the Drill Columns in Curvilinear Wells // Int. Appl. Mech. – 2007. – 43, N 11. – P. 80 – 89.
20. Huang N.C., Pattillo P.D. Helical buckling of a tube in an inclined well bore // Int. J. Non-Linear Mech. – 2000. – 35. – P. 911 – 923.
21. Iyoho A.W., Meize R.A., Millheim K.K., Grumrine M.J. Lessons from integrated analysis of GOM drilling performance // SPE Drill. and Compl. – 2005. – March. – P. 6 – 16.
22. Mohiuddin M. A., Khan K., Abdulraheem A., Al-Majed A., Awall M.R. Analysis of wellbore instability in vertical, directional and horizontal wells using field data // J. Petrol. Sci. Eng. – 2006. – 55. – P. 83 – 92.
23. Popov V.G. Stress State of a Finite Elastic Cylinder with a Circular Crack Undergoing Torsional Vibration // Int. Appl. Mech. – 2012. – 48, N 2. – P. 430 – 437.
24. Sawaryn S. J., Thorogood J. L. A compendium of directional calculations based on the minimum curvature method // SPE Drilling and Completion. – 2005. – March. – P. 24 – 36.
25. Sheppard M.C. Designing well paths to reduce drag and torque // SPE Drill. Eng. – 1987. – December. – P. 344 – 350.

Поступила 06.03.2012

Утверждена в печать 03.12.2013