

УДК 539.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАИМЕНЕЕ ЭНЕРГОЗАТРАТНЫХ РЕЖИМОВ БУРЕНИЯ СВЕРХГЛУБОКИХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ СКВАЖИН

Поставлена проблема компьютерного моделирования механического поведения конструкций бурильных колонн в глубоких наклонно направленных скважинах и прогнозирования возможного возникновения нештатных ситуаций в режимах бурения и выполнения спуско-подъемных операций.

Создано математическое обеспечение для анализа этих процессов. На этапах проектирования протяженной криволинейной скважины со сложной трехмерной геометрией и технологических режимов ее проходки разработанное математическое обеспечение позволяет строить её траекторию, обеспечивающую наименьшие значения сил сопротивления перемещению бурильной колонны и подбирать наименее энергоемкие и безопасные режимы бурения.

The problem about computer simulation of mechanical behavior of drill strings in deep curvilinear bore-holes and prognosis of possible appearance of emergency situations in the regimes of drilling and performing lowering-raising operations are stated.

The software for the analysis of these processes is created. In the stages of the curvilinear bore-holes design and elaboration of their drivage regimes, the established software allows to construct its trajectory ensuring the lowest values of the resistance forces and to select the least energy consuming and safe regimes of drilling.

Ключевые слова: бурильная колонна, криволинейная скважина, геометрические несовершенства, упругое деформирование, прихват, спуско-подъемные операции.

Одной из важнейших технологических компонент добычи углеводородных топлив является бурение глубоких вертикальных и наклонно направленных скважин. Зачастую их проходка сопровождается нештатными и аварийными ситуациями, среди которых можно выделить:

- изгибную потерю устойчивости бурильной колонны под действием сил тяжести, крутящего момента, сил инерции вращательного движения и др. [1, 7, 8];
- самовозбуждение крутильных автоколебаний долота, сопровождающихся чередованием его быстрых и медленных движений [2, 4, 6, 9];
- возбуждение колебаний кружения (whirling) долота, связанных с нестабильностью всей системы и переходом долота от состояния чистого верчения к его перекачиванию по дну скважины [5];
- запираение и прихватывание бурильной колонны в криволинейной скважине в зонах повышенных значений сил трения и сил контактного взаимодействия бурильной колонны со стенкой скважины [3, 10].

Значительные технологические трудности, возникающие при проходке криволинейных скважин, обусловлены постоянной изменчивостью баланса сил гравитации, сил сопротивления (сил трения), сил инерции и сил упругости, действующих на долото и бурильную колонну (БК), а также моментов этих сил. Кроме того изменяется ориентация осей, определяющих направления физических характеристик породы, разрушаемой при бурении. Поэтому при буре-



В.И. Гуляев

заведующий кафедрой высшей математики Национального транспортного университета, д.т.н., профессор



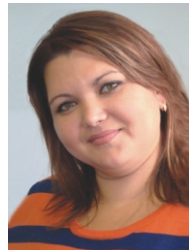
В.В. Гайдайчук

заведующий кафедрой теоретической механики Киевского национального университета строительства и архитектуры, д.т.н., профессор



Е.Н. Андрусенко

ассистент кафедры высшей математики Национального транспортного университета



Н.В. Шлюнь

аспирант кафедры высшей математики Национального транспортного университета

нии криволинейных скважин все еще часто случаются нештатные ситуации и аварии. Все это делает проблему компьютерного моделирования процессов движения и упругого деформирования бурильных колонн в каналах криволинейных скважин весьма актуальной.

На ранних этапах разработки технологий бурения криволинейных скважин рассматривались, как правило, скважины простейших геометрических очертаний с малыми искривлениями их осевых линий. В таких скважинах изгибные деформации колонн, как правило, невелики и ими можно было пренебречь. В этих случаях бурильная колонна моделировалась нерастяжимой нитью, а осевая линия скважины условно разбивалась на ряд прямолинейных или круговых участков или сегментов цепных линий. С использованием такого подхода был рассмотрен ряд задач о выполнении спуско-подъемных операций для криволинейных скважин и создано специальное математическое обеспечение.

С развитием технологий бурения криволинейных скважин они стали приобретать более сложную геометрию, их глубины увеличивались, а горизонтальные удаления от бурильной установки превысили 12 км. Естественно, что процесс бурения таких скважин, связанные с ним энергозатраты и сопровождающие его нештатные ситуации стали намного чувствительнее к ошибкам, допущенным при проектировании скважины, а также к геометрическим несовершенствам ее осевой линии, неизбежным при их проходке. При этом особую опасность представляют коротковолновые геометрические несовершенства с малыми радиусами кривизны, поскольку приводят к увеличению внутренних изгибающих моментов в бурильной колонне, вызывающих возрастание сил контактного и фрикционного взаимодействия между колонной и стенками скважины.

В данной работе описана методика компьютерного моделирования технологических приемов, минимизирующих энергозатраты при перемещении БК в канале скважины с геометрическими несовершенствами. Она может быть использована на этапах проектирования геометрии скважины и определения требований к ее точности, на этапах проектирования режимов проходки скважины и их осуществления, а также при выполнении операции освобождения БК от прихвата.

Математическая модель процесса протягивания бурильной колонны в канале криволинейной скважины. Количественные возрастания глубин и длин наклонно направленных скважин, а также искривленности их осевых линий приводят к необходимости качественного

изменения технологических приемов их проходки. Может оказаться, что в результате допущенных при бурении геометрических искажений скважины силы сопротивления перемещению в ней бурильной колонны настолько увеличиваются, что режимы бурения и выполнения спуско-подъемных операций становятся весьма энергозатратными или невозможными.

С целью моделирования механических явлений, сопутствующих процессу бурения, и выбора их наиболее благоприятных характеристик используем математическую модель, основанную на теории гибких криволинейных стержней [3]. Примем, что БК перемещается с осевой скоростью \dot{w} и вращается с угловой скоростью в канале скважины, осевая линия T которой известна. В неподвижной декартовой системе координат $Oxyz$ она задается в параметрической форме

$$(s), \quad (1)$$

где $r(s)$ – дифференцируемая вектор-функция $x^i y^j z^k$, описывающая осевую линию скважины; i, j, k – орты системы координат $Oxyz$; s – параметр, измеряемый длиной осевой линии от начальной точки до рассматриваемой.

Считаем, что осевые линии БК и скважины совпадают. Тогда с помощью равенства (1) можно определить все геометрические характеристики изогнутой БК и подсчитать ее изгибное напряженное состояние.

Свяжем с линией T подвижный трехгранник Френе. Его единичные векторы τ, n, b подсчитываются так [3]:

$$\tau = \frac{dr}{ds}, \quad n = R \tau, \quad b = n \times \tau. \quad (2)$$

Здесь штрихом обозначено дифференцирование по s ; R – радиус кривизны, определяющий кривизну k_R осевой линии и ее кручение k_T [3].

Введём подвижную правостороннюю систему осей (u, v, w) , ориентация которой связана с рассматриваемым поперечным сечением колонны в его центральной точке. Проанализируем равновесие внутреннего упругого момента $M(s)$ и упругой силы $F(s)$, а также внешней распределённой силы $f(s)$ и распределённого момента $m(s)$, приложенных к элементу колонны. С использованием системы осей (u, v, w) уравнения равновесия сил и моментов можно придать форму

$$\frac{dF}{ds} + F f, \quad \frac{dM}{ds} + M F m. \quad (3)$$

Здесь $\tilde{d}\dots/ds$ обозначает операцию локального дифференцирования; \vec{a} – вектор Дарбу, который определяется как вектор угловой скорости подвижного трёхгранника Френе при движении его начала с единичной линейной скоростью вдоль осевой линии бурильной колонны и подсчитывается по формуле

$$k_R b \quad k_T \quad . \quad (4)$$

Рассмотрим вначале случай, когда при протягивании БК в канале скважины можно пренебречь силами инерции и считать, что внешние распределенные силы $f(s)$ и моменты $m(s)$ можно представить в форме

$$f \quad f^{gr} \quad f^c \quad f^{fr}, \quad m \quad m^{fr} \quad m^{fr}, \quad (5)$$

где $f^{gr}(s) \quad f_n^{gr}(s)n \quad f_b^{gr}(s)b \quad f^{gr}(s)$ – вектор сил тяжести; $f^c(s) \quad f_n^c(s)n \quad f_b^c(s)b$ – вектор распределённой силы контактного взаимодействия; $f^{fr}(s) \quad f^{fr}(s)$ – вектор силы фрикционного взаимодействия между поверхностями бурильной колонны и стенки скважины; $m^{fr}(s) \quad m^{fr}(s)$ – распределённый крутящий момент сил трения.

Используя соотношения (4), (5), представим уравнения (3) в скалярной форме

$$\begin{aligned} \frac{dF_n}{ds} &= k_R F \quad k_T F_b \quad f_n^{gr} \quad f_n^c; \\ \frac{dF_b}{ds} &= k_T F_n \quad f_b^{gr} \quad f_b^c; \\ \frac{dF}{ds} &= k_R F_n \quad f^{gr} \quad f^{fr}; \\ 0 &= k_R M \quad A k_R k_T \quad F_b; \\ \frac{dk_R}{ds} &= \frac{1}{A} F_n; \\ \frac{dM}{ds} &= m^{fr}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь F_n, F_b, F, M – чисто статические факторы, определяемые, как показано ниже, из уравнений равновесия; изгибающий момент M_b подсчитывается из уравнения теории упругости.

Используемые в (6) проекции вектора сил тяжести подсчитываются так:

$$\begin{aligned} f_n^{gr} &= ag(\tau_1) n_z, \quad f_b^{gr} = ag(\tau_1) b_z; \\ f^{gr} &= ag(\tau_1) z. \end{aligned}$$

Здесь a – площадь поперечного сечения трубы; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; τ_1, τ_2 – плотности материала трубы и промывающей жидкости соответственно.

Примем, что БК протягивается в канале скважины со скоростью \dot{w} и одновременно прокручивается с угловой скоростью $\dot{\varphi}$. Тогда между поверхностями БК и скважины реализуется условие трения Кулона. В этом случае модуль полной распределённой силы трения подсчитывается так:

$$|f^{fr}| = |f^c| \sqrt{(f_n^c)^2 + (f_b^c)^2}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент трения скольжения.

Разложим эту силу на компоненты в осевом и окружном направлениях

$$\begin{aligned} f^{fr} &= f^c \frac{\dot{w}}{\sqrt{\dot{w}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2}}; \\ f^{fr} &= f^c \frac{r}{\sqrt{\dot{w}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2}}, \end{aligned} \quad (9)$$

где r – наружный радиус трубы.

Сила f^{fr} препятствует движению БК в осевом направлении, в то время как действие силы f^{fr} приводит к возникновению распределённого крутящего момента m^{fr} [3].

Таким образом, как вытекает из уравнений (6)–(9), напряженно-деформированное состояние БК при ее осевом движении со скоростью \dot{w} и одновременном вращении со скоростью описывается двумя уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dF}{ds} &= k_R F_n \quad f^{gr} \quad f^{fr}; \\ \frac{dM}{ds} &= m^{fr}, \end{aligned} \quad (10)$$

в которых функции k_R и f^{gr} являются известными, а функции f^{fr}, m^{fr} и F_n – искомыми.

Интегрирование системы уравнений (10) при заданных начальных условиях

$$F(0) = F^0, \quad M(0) = M^0 \quad (11)$$

позволяет построить функции $F(s), M(s)$ ($0 \leq s \leq S_i$) и определить значения осевой силы $F(S_i)$ и крутящего момента $M(S_i)$, которые нужно приложить в точке $s = S_i$ подвеса БК, чтобы осуществить заданный технологический режим при известной в данный момент времени t_i длине S_i БК и заданном отношении скоростей осевого (\dot{w}) и окружного ($r \dot{\varphi}$) движений. При этом, как показали теоретические исследования для скважин с различными геометрическими несовершенствами [8, 10], значение параметра оказывает существенное влияние на выполнимость технологических операций бурения. Так,

увеличение параметра приводит к увеличению $F(S_i)$ и уменьшению $M(S_i)$ и, наоборот, уменьшая r , можно уменьшать $F(S_i)$ и увеличивать $M(S_i)$.

Отмеченная возможность изменения величин $F(S_i)$, $M(S_i)$ и управления технологическим процессом на каждом его этапе за счет варьирования параметра позволяет не только прогнозировать и избегать нештатных ситуаций, но также подбирать наименее энергоёмкие режимы процессов бурения. Действительно, пусть в процессе выполнения технологической операции достигнута длина скважины S_i . Считается, что средствами каротажного зондирования установлена реальная геометрия и допущенные на этой длине несовершенства. Работу dW по выполнению технологической операции на элементарном отрезке ds можно представить в виде

$$dW = F(S)ds + M(S)dr. \quad (12)$$

Поскольку

$$\frac{r}{\dot{w}} = \frac{rd}{ds}$$

можно заменить d $\frac{ds}{r}$ и представить (12) в

виде

$$dW_i = [F(S) + M(S)/r]ds. \quad (13)$$

Решая систему (10) с учетом реальной длины S_i и имеющих на этом этапе геометрических несовершенств при разных r , подберем такое его значение r_i , при котором dW_i для данного режима при данной длине S_i имеет минимум. В этом случае величина r_i выбирается исходя из технических данных и возможностей приводного устройства бурильной установки.

Найденные значения r_i , $F(S_i)$, $M(S_i)$ используются для проходки скважины на ее отрезке $S_i - S_{i-1} - S_i$, после чего по описанной методике вычисляются значения r_{i+1} , $F(S_{i+1})$, $M(S_{i+1})$ и описанная процедура повторяется на отрезке $S_{i+1} - S_i - S_{i+1}$. Отметим, что если выполняется операция подъема БК, то $S_i = 0$ и S_i дискретно изменяется от $S_i = S$ до $S_N = S/N$, где N число отрезков, на которые условно разбивается осевая линия скважины. При спуске БК $S_i = 0$ и S_i изменяется от $S_1 = S/N$ до $S_N = S$.

Предложенный подход может быть использован как на этапе проектирования скважины, так и при ее проходке. В первом случае гипотетические параметры траектории скважины и ее несовершенств могут варьироваться в широких

пределах исходя из технологических возможностей их реализации. Во втором случае задаются реальные значения этих параметров, найденные в результате проведения работ каротажного зондирования.

Геометрическое представление осевой линии скважины с локализованными спиральными несовершенствами. Пусть в проектном состоянии траектория скважины представляет собой часть идеальной гиперболической кривой (рис. 1).

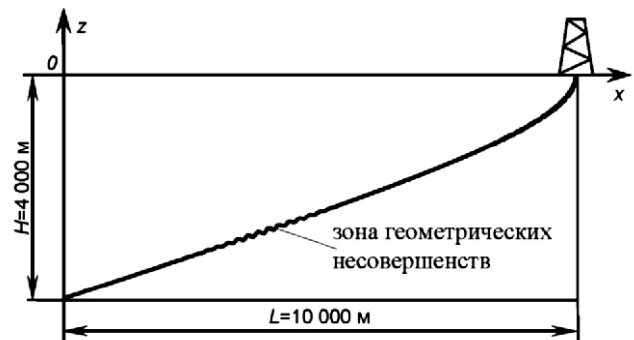


Рис. 1. Геометрическая схема наклонно направленной скважины с геометрическими несовершенствами

Её уравнения имеют вид

$$x = \frac{L(1 - \epsilon)}{1 - \cos \epsilon} \cos \epsilon, \quad y = \frac{L(1 - \epsilon)}{1 - \cos \epsilon} \sin \epsilon, \quad z = \frac{H}{1 - \cos \epsilon} \sin \epsilon. \quad (14)$$

Здесь H – глубина скважины; L – удаление по горизонтали нижнего конца скважины от бурильной установки; ϵ – эксцентриситет; ϵ – безразмерный параметр, связанный с координатой s равенством

$$ds = Dd\epsilon, \quad (15)$$

где D – метрический множитель, подсчитываемый по формуле

$$D = \sqrt{(dx/d\epsilon)^2 + (dy/d\epsilon)^2 + (dz/d\epsilon)^2}. \quad (16)$$

Однако, поскольку в реальных условиях невозможно обеспечить заданное очертание осевой линии скважины, как правило, в её геометрию вносятся некоторые искажения. Наиболее часто возникшие таким образом геометрические несовершенства имеют вид локализованных трёхмерных спиралей (рис. 2, а), локализованных плоских гармоник (рис. 2, б) или сглаженных изломов (рис. 2, в). Для примера выберем наиболее сложный вид несовершенства, имеющего форму локализованной спирали.

Её шаг $2/k$ определяется волновым числом k , принятым постоянным, а радиус $h(s)$ имеет максимальное значение h_c в точке $s = s_c$ и убывает согласно соотношению

$$h(s) = h_c e^{-2 \frac{s - s_c}{S}} \quad (17)$$

Здесь α – коэффициент, определяющий представительный диапазон изменения $h(s)$.

В этом случае уравнения искажённой осевой линии скважины могут быть представлены в форме

$$\begin{aligned} x &= \frac{L(1 - \cos \alpha s)}{1 - \cos \alpha} \cos \alpha s \\ h(s) \cos(ks) &= \frac{H(\cos \alpha s)}{\sqrt{L^2(1 - \cos \alpha)^2 \sin^2 \alpha s + H^2(\cos \alpha s)^2}}, \\ y &= h(s) \sin(ks), \\ z &= \frac{H}{1 - \cos \alpha} \sin \alpha s \\ h(s) \cos(ks) &= \frac{L(1 - \cos \alpha) \sin \alpha s}{\sqrt{L^2(1 - \cos \alpha)^2 \sin^2 \alpha s + H^2(\cos \alpha s)^2}}. \end{aligned} \quad (18)$$

С помощью этих соотношений можно определить геометрические величины (2), (16), используемые в разрешающих уравнениях (10) вместе с равенствами (7)–(9). В общем случае моделируемые несовершенства могут быть локализованы в нескольких местах $s = s_c$ оси скважины и иметь различные параметры h_c и α . Для такой геометрии их следует моделировать путём суперпозиции различных спиралей на проектируемой траектории.

Энергосберегающий режим подъёма буровой колонны в скважине со спиральными несовершенствами. На основе разработанного подхода рассмотрена задача о проектировании энергосберегающего режима подъёма буровой колонны в скважине с локализованными спиральными несовершенствами.

При проектировании геометрии скважины и технологии её проходки необходимо принимать во внимание некоторое число определяющих факторов, включающих горизонтальное удаление нижнего конца колонны от буровой установки (превышающее 12 км), глубину (до 4 км), очертание осевой линии (в нашем случае гипербола) и возможное наличие геометрических несовершенств. Ниже рассмотрен случай, когда траектория гиперболы (14) задана в облас-

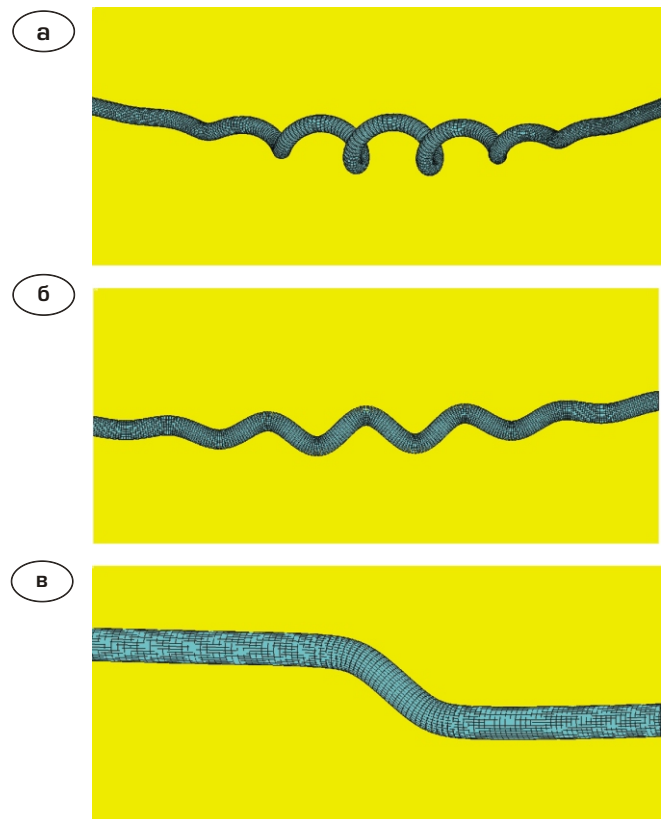


Рис. 2. Схемы геометрических несовершенств скважины: а – спиральный взвлет; б – гармонический взвлет; в – сглаженные изломы

ти $3/2$ 2 и определена значениями $H = 4000$ м, $L = 10000$ м, $\alpha = 3$. Несовершенства (18) с амплитудой $h_c = 2$ м и шагом 109 м наложены на её траекторию. Их центр локализован в точке $S_c = 3S/8$. Здесь S – длина осевой линии скважины, посчитываемая по формуле

$$S = \frac{2}{3/2} D(\alpha) d = 10942,7 \text{ м.}$$

Отметим, что принятые несовершенства визуально неразличимы в масштабе, принятом для рис. 1, и для наглядности представлены на нём в увеличенном виде.

При выполнении расчётов были использованы следующие значения определяющих факторов: $r = 0,08415$ м, толщина трубы колонны $0,01$ м, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $G = 0,8077 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho_t = 7850$ кг/м³, $\rho_l = 1500$ кг/м³, $\alpha = 0,2$. Полная осевая сила, действующая на трубу буровой колонны, помещённую в вертикальную прямолинейную скважину, заполненную промывочной жидкостью, составляет $P = \alpha g(\rho_t - \rho_l) S = 3389972$ Н.

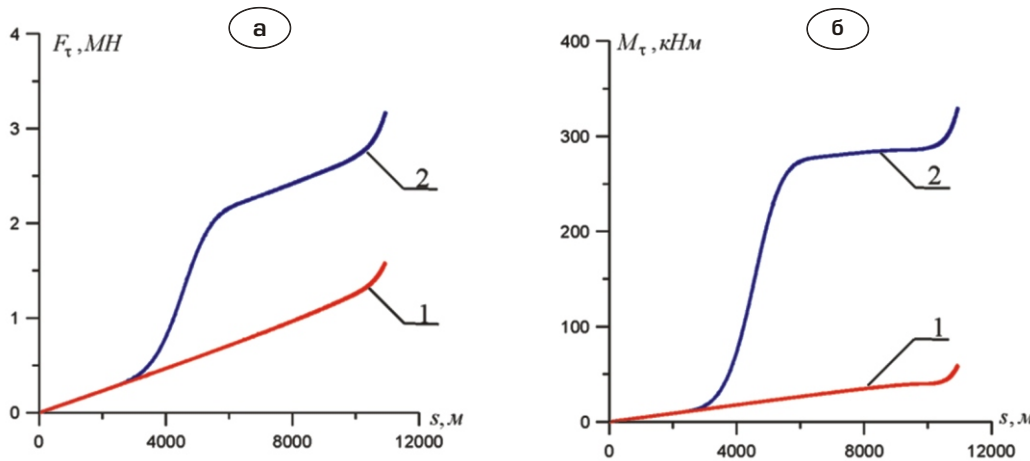


Рис. 3. Функции распределения продольной силы F (а) и крутящего момента M (б) вдоль осевой линии буровой колонны (кривые 1 – для скважины с идеальной геометрией, кривые 2 – для скважины с геометрическими несовершенствами)

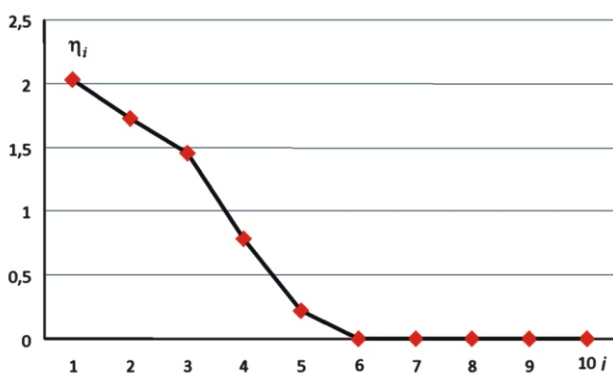


Рис. 4. График изменения параметра η_i , минимизирующего энергозатраты при выполнении операции подъема буровой колонны

На рис. 3 показаны функции распределения осевой силы $F(s)$ и крутящего момента $M(s)$ при отсутствии (кривые 1) и наличии (кривые 2) несовершенств при $\eta = 1$. Можно видеть, что в зонах искажения осевой линии эти силовые факторы резко возрастают и продолжают увеличивать свои значения вплоть до верхней точки $s = S$.

Для решения задачи минимизации энергозатрат при подъеме буровой колонны вся её длина S условно разбивается на N отрезков S_i . Принято, что по мере подъема колонны её длина S_i уменьшается на величину ΔS_i . На этой длине для заданной геометрии решается задача для уравнений (10) при различных соотношениях

r/\dot{w} между скоростями окружного (r) и осевого (\dot{w}) движений и выбирается такое значение η_i , при котором работа

$$dW_i = F(S)ds + M(S)d\varphi,$$

затрачиваемая на подъем колонны на этом этапе, была минимальна.

На рис. 4 приведен график изменения величины η_i , построенный для случая разбиения длины S на десять участков оптимизации. Из него вытекает, что при полной длине колонны наименьшее сопротивление перемещению колонны и наименьшие энергозатраты обеспечиваются при $\eta_i = 1$. Однако по мере подъема колонны необходимость во вращении колонны уменьшается и когда участок с несовершенствами пройден, эта её необходимость отпадает совсем, поскольку тогда $\eta_i = 0$.

Необходимо подчеркнуть, что предлагаемое математическое обеспечение позволяет принимать во внимание и дополнительные динамические эффекты. Оно может быть использовано на этапах проектирования скважины для моделирования влияния на процесс бурения допущенных геометрических несовершенств и разработки требований по точности проходки скважины, а также на этапах проходки скважины для оценки влияния реальных несовершенств, установленных путём каротажных измерений, на возможность возникновения аварийных ситуаций и прихватов. Данное математическое обеспечение может быть использовано для компьютерного сопровождения процедур освобождения колонны от прихватов.

Выводы.

Предложена методика геометрического представления локализованных геометрических несовершенств. Результаты компьютерного моделирования технологических операций проходки глубоких криволинейных скважин свидетельствуют, что функции контактных и трictionных сил, порождённых взаимодействием буровой колонны со стенкой скважины, рез-

ко возрастают в зонах искажения её осевой линии и могут быть причиной возникновения нештатных и аварийных ситуаций.

Показано, что силы сопротивления движению буровой колонны в скважине могут регулироваться путём совмещения её осевых и вращательных движений. Предложен метод минимизации энергозатрат при выполнении технологических операций бурения путём выбора

расчётных значений отношения между скоростями этих движений.

Предложенный подход может быть использован для выбора рациональных технологических режимов бурения на этапах проектирования скважин и процессов бурения при компьютерном мониторинге спуско-подъёмных операций, бурения и освобождения колонн от прихватов.

- [1] 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. (USA)
- [2] Gulyayev V.I., Borshch O.I. Free vibrations of drill strings in hyper deep vertical bore-wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – V. 78. – P. 759–764. (USA)
- [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. – V. 48. – P. 110–118. (USA)
- [4] Gulyayev V.I., Hudoliy S.N., Glushakova O.V. Simulation of torsion relaxation auto-oscillations of drill string bit with viscous and coulombic friction moment models // Journal of Multi-body Dynamics. – 2011. – V. 225. – P. 139–152. (England)
- [5] Gulyayev V.I., Shevchuk L.V. Nonholonomic dynamics of drill string bit whirling in a deep bore-hole // Journal of Multi-body Dynamics. – 2013. – Accepted for publication. (England)
- [6] Гуляев В.И., Глушакова О.В., Худолий С.Н. Квантованные аттракторы в волновых моделях торсионных колебаний колонн глубокого бурения // Изв. РАН. МТТ. – 2010. – № 2. – С. 134–147.
- [7] Андрусенко Е.Н., Гуляев В.И., Худолий С.Н. Изгиб буровой колонны в криволинейной скважине с несовершенствами осевой линии // Прикладная математика и механика. – 2012. – № 3. – С. 459–468.
- [8] 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. – V.4. – No.1. – P.1–16. (Taiwan)
- [9] Gulyayev V.I., Glushakova O.V. Large-scale and small-scale self-excited torsional vibrations of homogeneous and sectional drill strings // Interaction and Multiscale Mechanics. – 2011. – V. 4. – No.4. – P.291–311. (Taiwan)
- [10] Gulajew W.J., Chudek M., Kugiel M., Lugowoj P.Z., Krawiec W.G., Solowiew G., Andruszenko E.N. Analiza numeryczna efektow w zakleszczaniu kolumn wiertniczych w otworach krzywoliniowych z geometrycznymi defektami // Przegląd Geomiczy. – 2010. – V. 66, – № 12. – P. 18–25. (Poland)
- [11] Гуляев В.И., Гайдайчук В.В., Худолий С.Н., Борщ Е.И. Напряженно-деформированное состояние конструкций навеса НСК «Олимпийский» при локализованном тепловом воздействии // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2011. – № 4. – С. 6–12.

Надійшла 05.09.2013 р.

Книжковий огляд

ИСПЫТАНИЯ И МОНИТОРИНГ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ Шульман З.А., Шульман И.З.

В книге обобщен многолетний опыт экспериментальных исследований и испытаний строительных металлоконструкций широкой номенклатуры, уникальных по конструктивным решениям и специальных по назначению зданий и сооружений.

На конкретных примерах натуральных и модельных исследовательских экспериментальных работ и испытаний, выполненных в разные годы, описаны специально разработанные методы и средства измерений, приведены основные результаты и сформулированы выводы, представляющие интерес для инженеров-строителей, занимающихся изучением и оценкой действительной работы проектируемых и эксплуатируемых крупных инженерных сооружений.

Особое внимание в книге уделено исследованию наиболее важных характеристик сооружений – динамических параметров работы конструкций в условиях реальных природных воздействий и технологических нагрузок, предложен системный подход к оснащению крупных строительных объектов системами мониторинга.

Книга может быть полезна научным и инженерно-техническим работникам строительной отрасли, занимающимся исследованием, проектированием и эксплуатацией инженерных сооружений.

Контактный телефон: 38-056-790-03-62; 38-067-565-62-28. E-mail: promstal.dir@gmail.com



Шульман З.А., Шульман И.З.
Испытания и мониторинг инженерных сооружений. – Д.: «ЛИРА», 2013. – 53 с., рис. 174, табл. 47.