

А. А. Малюгин, Д. В. Казунин

РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В СОСТАВЕ ТРЕНАЖЕРНЫХ СИСТЕМ

АО «Кронштадт Технологии», Российская Федерация,
199178, Санкт-Петербург, Малый пр. В.О., 54, к. 5, лит. П

Предложена математическая модель динамики бурильной колонны в скважине для тренажерной системы реального времени, которая основана на модели длинного упругого стержня в оболочке при допущении малости углов изгиба. Продольные, крутильные и поперечные колебания колонны в этом случае описываются системой нелинейных уравнений в частных производных. Данная модель позволяет имитировать износ инструмента и механические осложнения, которые могут возникать в процессе бурения. На основе метода конечных элементов и неявной дискретизации по времени реализован алгоритм, имеющий линейную сложность в зависимости от количества конечных элементов. Он позволяет вести расчет как в реальном, так и в ускоренном времени. Коэффициенты модели настроены на основе неполных опытных данных, предоставленных операторами буровых платформ. Для определенных геологических условий, конфигурации оборудования и скважины представлены расчеты и получены различные режимы динамики, зависящие от управляющих параметров: зоны длительной остановки, равномерного и неравномерного вращения. Показано, что при попадании в режим неравномерного вращения резко снижается скорость движения в породе. Отображаемые в тренажерной системе величины (линейные и угловые скорости, нагрузки на различные элементы колонны, моменты вращения) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Библиогр. 9 назв. Ил. 5.

Ключевые слова: тренажер-имитатор, бурильная колонна, диаграмма зон динамики вращения бурильной колонны, нагрузка на долото, скорость проходки.

A. A. Malyugin, D. V. Kazunin

CALCULATION OF DRILLSTRING VIBRATIONS IN REAL TIME AS PART OF TRAINING SYSTEM

АО «Kronshtadt Technology», 54, k. 5, lit. P, Malyi pr. V.O.,
St. Petersburg, 19178, Russian Federation

A mathematical model of the dynamics of the drillstring in the hole for a real-time system which is based on the model of the long elastic rod in the shell with small bending angle assumption is discussed. The longitudinal, torsional and transverse vibrations of the column in this case are described by a system of nonlinear partial differential equations. This model allows for the simulation tool wear and mechanical complications that can occur during drilling. Based on the FEM and implicit sampling time, the algorithm was implemented with linear complexity depending on the number of finite elements. It allows for calculation of both the real and the accelerated time. The coefficients of the model are set on the basis of incomplete experimental data provided by operators of drilling rigs. For certain geological conditions, equipment and well configuration presented calculations and obtained the dynamics of the various modes, depending on the control parameters: long stop zone, uniform and non-uniform rotation. It is shown that transition in the non-uniform rotation mode drastically reduced the rate of drilling.

Малюгин Алексей Александрович — соискатель; Alexey.Malyugin@kronshtadt.ru

Казунин Дмитрий Владимирович — доктор технических наук, доцент; dmitry.kazunin@kronshtadt.ru

Malyugin Alexey Alexandrovich — applicant; Alexey.Malyugin@kronshtadt.ru

Kazunin Dmitry Vladimirovich — doctor of technical sciences, associate professor; dmitry.kazunin@kronshtadt

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2017

Simulator system values behaviour (linear and angular speed, column elements load, torque) are in close location with the experimental data. Refs 9. Figs 5.

Keywords: simulator, drillstring, diagram of drillstring dynamics zones, force on bit, rate of drillin.

Введение. Активное развитие нефтедобывающей отрасли, усложнение процессов бурения и добычи углеводородов требуют качественной подготовки персонала. Одно из направлений этой подготовки — использование тренажерных систем реального времени, имитирующих рабочую среду для обучаемого. Такой подход имеет очевидные преимущества перед обучением на реальном оборудовании. Во-первых, обучение на тренажере-имитаторе позволяет в безопасном режиме отработать внештатные ситуации, в том числе и плохо прогнозируемые. Во-вторых, он выгоден и с экономической точки зрения, так как для него не нужен вывод оборудования из эксплуатации и исключаются его износ и поломка. Все вышесказанное относится и к тренажерам рабочего места бурильщика, имитирующего рабочую среду для обучаемого. Важнейшей частью тренажерной системы являются математические модели объектов и процессов. Модели в тренажерных системах бурения должны включать модели динамики бурильной колонны (БК), гидравлики растворов, а также и других объектов и процессов, происходящих при бурении. В данной работе внимание сосредоточено на моделировании динамики БК и связанных с ней процессов.



Рис. 1. Схема буровой установки

На рис. 1 изображена общая схема буровой установки. БК соединена с верхним приводом, подъем которого управляется системой удержания, включающей канаты, талевую систему, лебедку и другое оборудование. Вертикальная скважина создается поэтапно. На каждом этапе происходит бурение до заданной глубины, затем в скважину опускается обсадная колонна, которая потом цементируется. Таким образом,

вертикальная скважина имеет кусочно-постоянное сечение, диаметр которого уменьшается с увеличением глубины. Роторное бурение является самым распространенным способом создания скважины. Вращение от верхнего привода передается на долото, и при ненулевой нагрузке на него происходит углубление забоя.

Математическая модель динамики БК должна учитывать влияние бурового раствора, который под давлением подается внутрь бурильной трубы и через кольцевое пространство между БК и обсадной колонной или грунтом (затрубное пространство) возвращается на поверхность. Необходимо учесть взаимодействие долота с забоем, а также БК со стенками скважины. На модель, работающую в составе тренажерной системы, налагается ряд специальных требований:

1) параметры системы могут задаваться в широком диапазоне значений. БК может конфигурироваться из труб и долот различного класса. Глубина скважины может достигать нескольких километров. Геологический разрез скважины может содержать разнообразный набор грунтов;

2) модель должна имитировать определенный набор эффектов, имеющих место при эксплуатации реального оборудования. Должны воспроизводиться колебательные процессы, связанные с движением колонны с учетом наличия жидкости и контактом со стенками;

3) модель может работать как в реальном времени, так и в ускоренном режиме;

4) необходимо, чтобы видимые имитируемые величины, которые выводятся на панели приборов, вели себя адекватно в сравнении с реальными;

5) важным аспектом обучения является отработка действий во внештатных ситуациях. Поэтому функциональность модели должна включать имитации осложнений и аварийных ситуаций: прихваты, затяжки и обрыв.

Исходя из требований к функциональности тренажера, была выбрана модель длинного упругого стержня в скважине. Сделано допущение о малости углов изгиба, что верно для движения БК в скважине, так как диаметры труб и скважины — величины одного порядка. При этом предполагается, что БК состоит из труб постоянного диаметра. Скважина имеет кусочно-постоянный профиль с учетом незначительно изменяющегося диаметра обсадной колонны. Инерцией относительно поперечной оси можно пренебречь. Для продольных движений принята вязко-упругая модель. Трение скольжения или качения зависит от относительной окружной скорости колонны в точке контакта.

1. Уравнения движения колонны. Обозначим глобальную декартову систему $OXYZ$. Ось OX направлена вверх, ее начало координат находится на пересечении оси скважины и поверхности земли (рис. 2), L_0 — длина трубы в ненагруженном состоянии, ρ — плотность материала, A — площадь сечения, E — коэффициент упругости, G — модуль сдвига, I_p — полярный момент инерции сечения, I — момент сечения, β — коэффициент вязкости материала, d и D — внутренний и наружный диаметры трубы, D_h — диаметр скважины, ρ_{liq} — плотность раствора. Неизвестными величинами являются продольная координата сечения x , угол закручивания ψ , боковые смещения y, z :

$$x, \psi, y, z = F(t, s),$$

где s — естественная координата трубы ($0 \leq s \leq L_0$), $s = 0$ соответствует нижнему концу БК. Обозначим производную по s через $'$. Сделано предположение о малости углов изгиба: $y' \ll 1$, $z' \ll 1$. Для произвольного вектора a проекция на плоскость

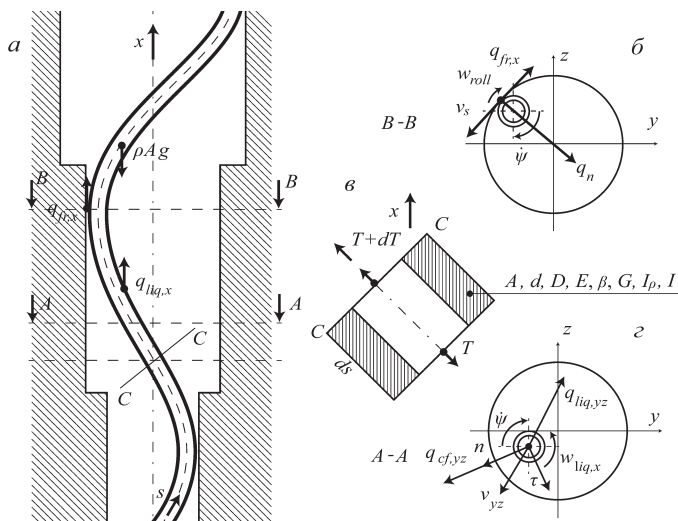


Рис. 2. Вертикальный срез БК и скважины (а), горизонтальные сечения БК и скважины (б, з) и боковое сечение БК (е)

OYZ обозначена a_{yz} . Уравнения динамики БК в скважине имеют вид [1–4]

$$\begin{aligned}
 \rho A \ddot{x} - T' &= q_x, \\
 T &= EA(x' - 1 + \beta \dot{x}' - 0.5(y'^2 + z'^2)), \\
 \rho I_p \ddot{\psi} - (GI_p \psi')' &= w_x, \\
 (\rho + \rho_a) \ddot{y} + (EI y'')'' + (GI_p \psi' z'')' - T y'' &= q_y, \\
 (\rho + \rho_a) \ddot{z} + (EI z'')'' - (GI_p \psi' y'')' - T z'' &= q_z,
 \end{aligned} \tag{1}$$

здесь ρ_a — присоединенная масса раствора на единицу длины, q_x, q_y, q_z, w_x — проекции на оси системы координат удельных сил и моментов, действующих на сечение трубы:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{q} &= (\rho - \rho_{liq}) \mathbf{A} \mathbf{g} + \mathbf{q}_{cf} + \mathbf{q}_n + \mathbf{q}_{fr} + \mathbf{q}_{liq}, \\
 w_x &= w_{fr,x} + w_{roll,x} + w_{liq,x}.
 \end{aligned}$$

Первое слагаемое есть силы тяжести и плавучести. Индекс n соответствует нормальной силе контакта, fr — силе трения скольжения, cf — центробежной силе, liq — сопротивлению раствора, $roll$ — трению качения.

Введем обозначения: $r_0 = 0.5(D_h - D)$, n и τ — соответственно радиальный и касательный орты для текущего положения, $\mathbf{r} = [0 \ y \ z]^T$. Скорость скольжения при контакте v_s вычисляется по формуле $v_s = 0.5 D_h (-\dot{y} z + \dot{z} y) / r_0^2 - 0.5 D \dot{\psi}$. Контакт со стенкой скважины рассчитывается с помощью штрафной функции f_n , непрерывной вместе с первой производной. Компоненты сил и моментов записываются следующим образом:

$$\mathbf{q}_n = -f_n(r) \mathbf{r} / r, \quad f_{fr}(r) = \begin{cases} 0 & \text{при } r \leq r_0, \\ a_{n2}(r - r_0)^2 & \text{при } r_0 < r \leq r_0 + \epsilon_r, \\ 2a_{n2}\epsilon_r(r - r_0) - a_{n2}\epsilon_r^2 & \text{при } r > r_0 + \epsilon_r, \end{cases}$$

$$\mathbf{q}_{fr} = -\frac{\mu_s f_{fr}(v_s) f_n(r)}{\sqrt{\dot{x}^2 + v_s^2}} \left[|\dot{x}|, \quad -z |v_s|/r_0, \quad y |v_s|/r_0 \right]^T,$$

$$w_{fr,x} = (q_{fr,z} y - q_{fr,y} z) 0.5D/r_0, \quad w_{roll,x} = -\mu_r f_{roll}(\dot{\Psi}),$$

$$\mathbf{q}_{cf} = \rho v_\tau^2 / r^2 \mathbf{r},$$

$$\mathbf{q}_{liq} = \left[-\alpha_x \dot{x}, \quad -0.5 \rho_{liq} \alpha_{yz} \sqrt{\dot{y}^2 + \dot{z}^2} [\dot{y}, \dot{z}] \right]^T,$$

где $\alpha_x, \alpha_\Psi, \alpha_{yz}, \mu_s, \mu_r, \epsilon_r, a_{n2}$ — коэффициенты модели, зависящие от типа раствора и стенок скважины. Функции f_{fr}, f_{roll} представляют собой приближения единичной ступенчатой функции.

Примем граничные условия

$$T(L_0, t) = F_{TD}(t), \quad \dot{x}(0, t) = v_p(P_b, \dot{\psi}_b, Q_b, soil),$$

$$\dot{\psi}(L_0, t) = n_0(t), \quad GI_p \psi'(0, t) = M_b(P_b, \dot{\psi}_b, Q_b, soil),$$

$$y(L_0) = 0, \quad y'(L) = 0, \quad y(0) = 0, \quad y''(0) = 0,$$

$$z(L_0) = 0, \quad z'(L) = 0, \quad z(0) = 0, \quad z''(0) = 0,$$

в них n_0 — скорость вращения верхнего привода, $n_b = \dot{\psi}_b$ — скорость вращения долота, P_b — нагрузка на долото, Q_b — расход бурового раствора через долото, v_p — скорость углубления забоя, M_b — момент сопротивления на долоте, F_{TD} — сила, приложенная к верхнему концу БК, $soil$ — тип грунта. Зависимости v_p и M_b были выбраны на основе ранее предложенных полуэмпирических законов [5, 6], их качественный вид показан на рис. 3:

$$v_p = C_v P_b^\gamma f_{vn}(n_b) f_{vQ}(Q_b) \phi_v(t, P_b, n_b),$$

$$M_b = C_M P_b \left(1 + \frac{7.25}{n_b + \delta} \right) f_{MQ}(Q_b) \phi_M(t, P_b, n_b), \quad (2)$$

здесь γ, δ — некоторые константы, зависящие от типа грунта и долота; константы C_v, C_M зависят от типа разбуриваемого грунта и конфигурации БК, а именно компоновки низа колонны. Зависимости f_{vQ}, f_{MQ} в (2) учитывают расход раствора через

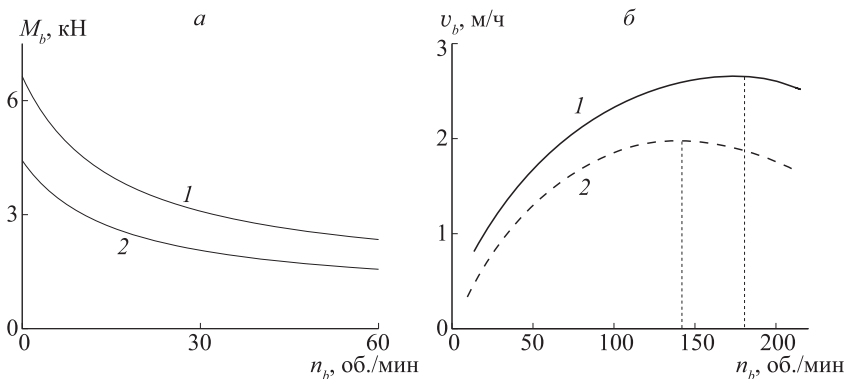


Рис. 3. Зависимости момента сопротивления M_b (а) и скорости проходки v_b (б) от оборотов долота n_b при разной нагрузке P_b (1 — $P_b = 15$ тс, 2 — $P_b = 10$ тс) при взаимодействии долота диаметром 144 мм с ангидритом

долото. Функция $f_{nv}(n_b)$ имеет максимум при определенной скорости вращения, зависящей от типа грунта и долота. Отметим важную составляющую модели — имитацию нештатных ситуаций и поломки. Так, модель долота через поправочные функции ϕ_v , ϕ_M учитывает время и условия работы долота, принимает во внимание его износ и определяет вероятность разрушения долот [7]. Возможно также задание механических осложнений, таких как прихваты и затяжки. В процессе расчета проверяются условия на разрыв трубы. В случае их выполнения образуются две колонны, каждая из которых рассчитывается отдельно.

Другой частью математической модели процессов бурения является гидравлическая модель, которая описывает движение вязкопластичной жидкости в гидравлической сети внутри колонны и в затрубном пространстве, а также в наземных насосах, сепараторах, трубопроводах, танках запаса. В данной работе акцент сделан только на динамику вращения БК. Жидкость оказывает влияние на нее через коэффициенты сопротивления α_x , α_ψ , α_{yz} и расход через долото Q_b . При этом в гидравлической модели учитываются потери давления на трение в долоте, зависящие от нагрузки и оборотов.

2. Расчетная схема. Пространственная дискретизация уравнений продольных и крутильных колебаний сделана методом конечных элементов. БК разбита на n элементов e_i различной длины. Границами элемента e_i являются вершины s_i, s_{i+1} . Длина этого элемента $h_i = s_{i+1} - s_i$. Для дискретизации x и ψ использованы линейные элементы

$$x(s) = \sum_{i=0}^n X_i \varphi_i(s), \quad \psi(s) = \sum_{i=0}^n \Psi_i \varphi_i(s),$$

где

$$\varphi_i(s) = \begin{cases} (s - s_{i-1})/h_{i-1} & \text{при } s_{i-1} < s \leq s_i, \\ (s_{i+1} - s)/h_i & \text{при } s_i < s \leq s_{i+1}; \end{cases}$$

$\mathbf{X} = [X_0, X_1, \dots, X_n]^T$; $\mathbf{\Psi} = [\Psi_0, \Psi_1, \dots, \Psi_n]^T$ — вектора-столбцы неизвестных значений в узлах. Дискретизация уравнений для боковых смещений должна учитывать отсутствие изломов БК при изгибе. Для этого подходят эрмитовы кубические элементы. Тогда для каждого узла вводится пара неизвестных для y и z — значение бокового смещения и его производной по естественной координате:

$$y(s) = \sum_{i=0}^n Y_i N_i(s), \quad y'(s) = \sum_{i=0}^n Y'_i N'_i(s), \quad \mathbf{Y} = [Y_0, Y'_0, \dots, Y_n, Y'_n]^T,$$

$$z(s) = \sum_{i=0}^n Z_i N_i(s), \quad z'(s) = \sum_{i=0}^n Z'_i N'_i(s), \quad \mathbf{Z} = [Z_0, Z'_0, \dots, Z_n, Z'_n]^T,$$

N_i, N'_i формируются линейным отображением из кубических полиномов \hat{N}_m следующего вида:

$$\begin{aligned} \hat{N}_0 &= 0.25(1 - \xi)^2(2 + \xi), \\ \hat{N}_1 &= 0.125h(1 - \xi)^2(1 + \xi), \\ \hat{N}_2 &= 0.25(1 + \xi)^2(2 - \xi), \\ \hat{N}_3 &= 0.125h(1 + \xi)^2(1 - \xi), \\ \xi &= \frac{2s}{h} - 1, \end{aligned}$$

h — длина элемента. Далее стандартными методами (домножением уравнений из (1) на пробные функции φ_j и N_j, N'_j , интегрированием по частям) приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ)

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_x \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}_x \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_x \mathbf{X} &= \mathbf{F}_x(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}), \\ \mathbf{M}_\psi \ddot{\Psi} + \mathbf{B}_\psi \dot{\Psi} + \mathbf{K}_\psi \Psi &= \mathbf{R}_\psi(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}), \\ \mathbf{M}_y \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}_y \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K}_y \mathbf{Y} + \mathbf{H}_{\psi z}(\Psi, \mathbf{Z}) - \mathbf{H}_{Ty}(\mathbf{T}, \mathbf{Y}) &= \mathbf{F}_y(\mathbf{X}, \Psi, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}), \\ \mathbf{M}_z \ddot{\mathbf{Z}} + \mathbf{B}_z \dot{\mathbf{Z}} + \mathbf{K}_z \mathbf{Z} + \mathbf{H}_{\psi y}(\Psi, \mathbf{Y}) - \mathbf{H}_{Tz}(\mathbf{T}, \mathbf{Z}) &= \mathbf{F}_z(\mathbf{X}, \Psi, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}), \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathbf{T} — вектор значений сил натяжения в узлах. Элементы матриц определяются через интегралы от произведения пробных функций и их производных. Так, для матриц, соответствующих уравнению продольной координаты, получаем

$$\mathbf{M}_{x,ij} = \int_0^{L_0} \rho A \varphi_i \varphi_j ds, \quad \mathbf{K}_{x,ij} = \int_0^{L_0} EA \varphi'_i \varphi'_j ds, \quad \mathbf{B}_{x,ij} = - \int_0^{L_0} \beta EA \varphi'_i \varphi_j ds, \quad i, j = \overline{0, n},$$

а элементами векторов \mathbf{H} являются квадратичные формы с матрицами $A^i_{\psi z}$, A^i_{Ty} , $A^i_{\psi y}$, A^i_{Tz} , например

$$\mathbf{H}_{\psi z, i} = \Psi^T A^i_{\psi z} Z, \quad \mathbf{H}_{Ty, i} = T^T A^i_{Ty} Y, \quad i = \overline{0, n}.$$

После дискретизации по времени неявными схемами разных порядков точности и применения полуявного подхода к квадратичным формам и слагаемым в правых частях системы ОДУ (3) приходим к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с блочной матрицей, блоки которой ленточные. Полученная СЛАУ решается с использованием метода Гаусса и LU-разложения.

3. Численные эксперименты. Важнейшим аспектом бурения скважин является существование различных зон динамики в зависимости от режимных параметров, которые задаются оператором установки при бурении [8, 9]. Определенные режимы нежелательны, они требуют большей мощности от двигателя, скорость углубления падает. Был проведен ряд расчетов для следующей конфигурации оборудования и скважины. Скважина по высоте состоит из двух участков: обсадной колонны и открытого участка из грунта твердого типа. Глубина скважины — 2100 м. БК составлена из долота диаметром 14 мм, 6 утяжеленных труб, 2 стабилизаторов и 212 бурильных труб. Общая масса БК 78.8 т и длина $L_0 = 2147$ м. Промывка проводится буровым раствором плотностью 1.4 т/м³. Коэффициенты зависимостей настроены в соответствии с неполными данными, полученными из справочной литературы и от персонала буровых установок. Расход Q_b равен 5 л/с. Коэффициент вязкости $\alpha_x = 0.4$ Н/с.

На рис. 4 изображены временные зависимости расчетных величин. Интервал расчета 0–105 с можно условно разделить на такие промежутки:

1) 0–15 с. Этот промежуток соответствует равномерному вращению, $n_0 = 60$ об./мин, $P_b = 9.8$ т. Скорость долота практически постоянна;

2) 15–60 с. После задания скорости вращения $n_0 = 18$ об./мин, а с 30 с $n_0 = 25$ об./мин, $P_b = 15.1$ т БК переходит в режим неравномерного вращения. Скорость вращения n_b колеблется от 0 до 90 об./мин. Отметим, что необходимым условием для появления неравномерного вращения является наличие убывающей зависимости момента сопротивления на долоте от скорости вращения;

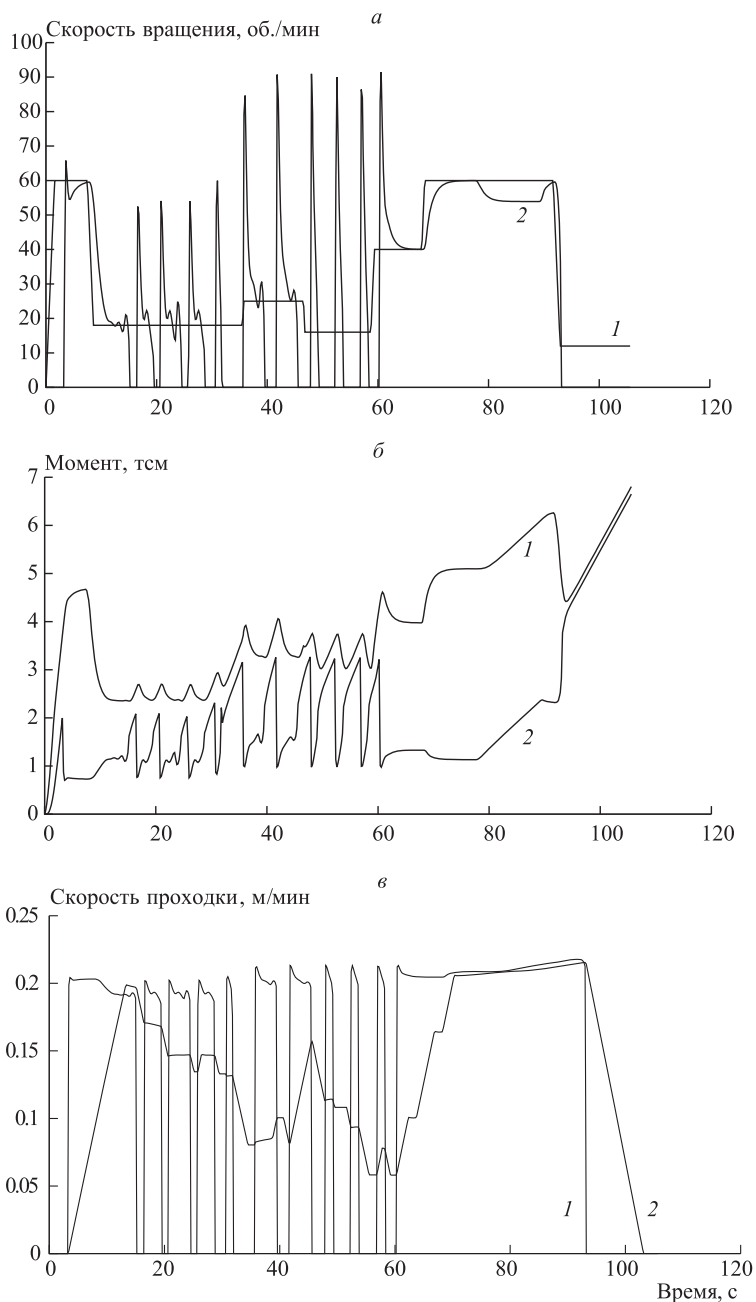


Рис. 4. Зависимости скоростей вращения (*a*),
 моментов сопротивления (*б*) и скорости проходки (*в*) от времени
a: 1 — n_0 , 2 — n_b ; *б:* 1 — M_0 , 2 — M_b ; *в:* 1 — скорость долота,
 2 — средняя скорость проходки.

3) 60–95 с. Увеличивая скорость верхнего привода до 40 об./мин, а затем и до 60 об./мин, БК возвращается в зону равномерного вращения;

4) 95–105 с. Также существует и зона длительной остановки (параметры $n_0 = 12$ рад/с, $P_b = 32.3$ т), когда со временем долото заклинивает.

Средняя скорость проходки при неравномерном вращении резко падает. Например, при нагрузке на долото $P_b = 9.8$ т при $n_0 = 18$ об./мин (неравномерное вращение) средняя скорость примерно равна 0.11 м/с, а при $P_b = 9.8$ т при $n_0 = 24$ об./мин (равномерное вращение) она уже достигает 0.15 м/с. С точки зрения производительности (главным критерием служит скорость проходки), равномерный режим бурения предпочтительнее. Кроме того, при неравномерном режиме происходят существенные колебания крутящих моментов и напряжений по всей длине БК, что плохо влияет на состояние труб, увеличивает их износ и может привести к поломкам.

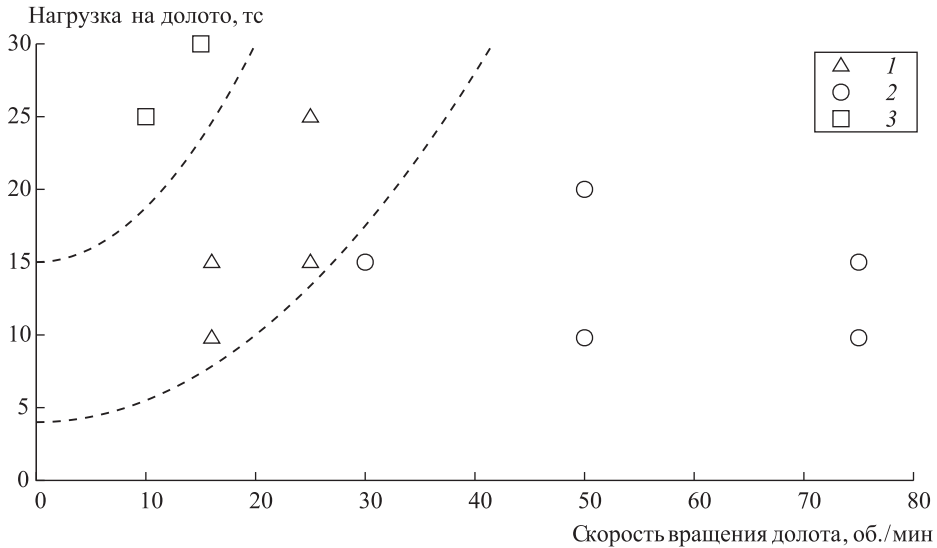


Рис. 5. Диаграмма зон динамики вращения БК

1 — неравномерное вращение; 2 — равномерное вращение; 3 — длительная остановка.

На рис. 5 изображена диаграмма зон динамики вращения БК: равномерного и неравномерного, длительной остановки. Проведен ряд расчетов для разных режимных параметров. Для каждого случая определен режим бурения. Графически построены границы зон. Численный эксперимент подтверждает существование различных зон динамики для рассматриваемой модели. Это является важным аспектом ее функциональности для целей обучения с использованием тренажера. Представленный результат качественно не противоречит логике и известным законам бурения. Однако необходимо получить подробные экспериментальные данные для более точной настройки модели.

Заключение. На основе анализа требований, предъявляемых к математической модели БК в скважине, предложена модель динамики длинной упругой трубы с некоторыми приближениями.

Построенная модель была реализована в виде вычислительного модуля, отвечающего требованиям минимальной ресурсоемкости. Также данный вычислительный модуль позволяет имитировать механические осложнения, которые могут возникать в процессе бурения, и износ отдельных элементов БК.

Настройка модели производилась на основе неполных опытных данных, представленных операторами буровых платформ или взятых из открытых источников.

Для определенной конфигурации оборудования и скважины проведены численные эксперименты при различных режимных параметрах. Интегральные расчетные данные (скорость проходки, нагрузка на долото, скорости вращения, нагрузка на крюк системы удержания) хорошо согласуются с опытными значениями. Кроме того, расчет показал существование зон динамики вращения БК: длительной остановки, равномерного и неравномерного вращения. Данный факт позволяет обучаемому не только отрабатывать действия первого уровня сложности: сборка–разборка БК, задание режимных параметров согласно геолого-техническому наряду, но и учиться распознавать по поведению показаний приборов нежелательный режим бурения, а далее в соответствии с определенными стратегиями бурения изменять управляющие параметры (скорость вращения верхнего привода, нагрузку на долото), стараясь избегать неблагоприятные режимы эксплуатации БК.

Литература

1. Tikhonov V. S., Safronov A. I. Analysis of postbuckling drillstring vibrations in rotary drilling of extended-reach wells // *Transactions ASME. J. Energy Resources Tech.* 2011. Vol. 133, N 4. P. 43102.
2. Tikhonov V. S., Safronov A. I., Gelfgat M. Ya. Method of dynamic analysis of rod-in-hole buckling // *Proc. 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Torino, Italy, 2006. P. N ESDA2006-95059.*
3. Светлицкий В. А. Механика стержней: в 2 т. Т. 2. Динамика. М.: Высшая школа, 1987. 304 с.
4. Malyugin A. A., Kazunin D. V., Kuznetsov N. V. Drillstring-hole calculation in drilling simulator // *Mechanics — Seventh Polyakhov's Reading. Intern. Conference. Saint Petersburg, 2015. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/POLYAKHOV.2015.7106755*
5. Басарыгин Ю. М., Булатов А. И., Проселков Ю. М. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 632 с.
6. Юнин Е. К. Автоколебания в глубоком бурении. М.: Книжный дом «Либроком», 2013. 264 с.
7. Сароян А. Е. Теория и практика работы бурильной колонны. М.: Недра, 1990. 263 с.
8. Leine R. I., van Campen D. H., Keultjes W. J. G. Stick-Slip whirl interaction in drill-string dynamics // *J. Vib. Acoust.* 2002. Vol. 124. P. 209–220.
9. Navarro-Lopez E. M., Suarez R. Modelling and analysis of stick-slip behavior in a drillstring under dry friction // *Congreso anual de la AMCA.* 2004. P. 330–335.

Для цитирования: Малогин А. А., Казунин Д. В. Расчет колебаний бурильной колонны в режиме реального времени в составе тренажерных систем // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления.* 2017. Т. 13. Вып. 1. С. 91–101. DOI: 10.21638/11701/spbu10. 2017.108

References

1. Tikhonov V. S., Safronov A. I. Analysis of postbuckling drillstring vibrations in rotary drilling of extended-reach wells. *Transactions ASME. J. Energy Resources Tech.*, 2011, vol. 133, no. 4, pp. 43102.
2. Tikhonov V. S., Safronov A. I., Gelfgat M. Ya. Method of dynamic analysis of rod-in-hole buckling. *Proceeding 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Torino, Italy, 2006, ESDA2006-95059.*
3. Svetlitsky V. A. *Mekhanika stержnei. V 2 t. T. 2. Dinamika [Rod Mechanics. In 2 vol. Vol. 2. Dynamics]*. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1987, 304 p. (In Russian)
4. Malyugin A. A., Kazunin D. V., Kuznetsov N. V. Drillstring-hole calculation in drilling simulator. *Mechanics — Seventh Polyakhov's Reading. Intern. Conference. Saint Petersburg, Russia, 2015, IEEE Xplore. DOI: 10.1109/POLYAKHOV.2015.7106755*
5. Basarygin Y. M., Bulatov A. I., Proselkov Y. M. *Tehnologia burenia neftiyanykh i gazovykh skvazhin [Technology of drilling oil and gas wells]*. Moscow, Nedra-Businesscenter Publ., 2002, 632 p. (In Russian)
6. Yunin E. K. *Avtokolebania v glubokom burenii [Self-oscillations in deep drilling]*. Moscow, Librokom Publ., 2013, 264 p. (In Russian)

7. Saroyan A. E. *Teoria i praktika raboty buril'noi kolonny* [Theory and practice of drillstring work]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 263 p. (In Russian)
8. Leine R. I., van Campen D. H., Keultjes W. J. G. Stick-Slip whirl interaction in drill-string dynamics. *J. Vib. Acoust.*, 2002, vol. 124, pp. 209–220.
9. Navarro-Lopez E. M., Suarez R. Modelling and analysis of stick-slip behavior in a drillstring under dry friction. *Congreso anual de la AMCA*, 2004, pp. 330–335.

For citation: Malyugin A. A., Kazunin D. V. Calculation of drillstring vibrations in real time as part of training system. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2017, volume 13, issue 1, pp. 91–101. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2017.108

Статья рекомендована к печати проф. Н. В. Егоровым.

Статья поступила в редакцию 12 июня 2016 г.

Статья принята к печати 19 января 2017 г.