

Основы математически строгой теории глубокого бурения

В.А. Коронатов

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

kortavik@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1331-213X>

Статья поступила 30.04.2020, принята 21.05.2020

Все современные теории бурения обладают одним общим существенным недостатком: они не могут описывать процесс погружения буровой колонны при углублении забоя скважины или делают это весьма упрощенно. Что приводит при моделировании процесса бурения к необходимости введения эмпирических соотношений и не позволяет полноценно описывать динамические явления. Для ликвидации такого недостатка и придания необходимой математической строгости автором разработана теория погружения вращающегося твердого тела в грунт применительно к буровой колонне. Возникающие со стороны забоя силы сопротивления аналитически задаются в зависимости от механической скорости бурения (погружения) и частоты вращения долота, с учетом прочностных свойств породы в забое. При моделировании процесса погружения колонны учитываются возможности заклинивания поступательного или вращательного движения долота, его отрыва (подпрыгивания) от породы в забое скважины. Моменты переключения с одного режима бурения на другой определяются через динамическое напряжение, возникающее в породе забоя, при сравнении со статическим предельно допустимым. Введенная одномассовая модель буровой колонны позволяет описывать возникающие во время бурения фрикционные релаксационные крутильные автоколебания. Принятая модель учитывает изменение крутильной жесткости колонны по мере ее удлинения, прочностные свойства породы, динамический характер сил сопротивления, влияние талевого системы. Впервые учитывается возникающее добавочное усилие как результат больших углов закрутки буровой колонны, приводящее к уменьшению осевого давления на долото — что актуально при глубоком бурении. Записанные уравнения позволяют математически строго описывать динамику процесса роторного бурения вертикальных скважин в однородном слое породы, без каких-либо эмпирических соотношений. Модель предусматривает возможность определения оптимальных режимов бурения.

Ключевые слова: теория бурения; буровая колонна; крутильные автоколебания; релаксационный режим; режим «stick – slip»; аппроксимация Паде для силы сопротивления; фрикционные автоколебания.

Fundamentals of the mathematically rigorous theory of deep drilling

V.A. Koronатов

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

kortavik@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1331-213X>

Received 30.04.2020, accepted 21.05.2020

All modern drilling theories have one common significant drawback: they cannot describe the process of sinking the drill string while deepening the bottom of the well or do it very simply. This leads to the necessity of introducing empirical relationships when modeling the drilling process and does not allow a full description of dynamic phenomena. To eliminate such a drawback and impart the necessary mathematical rigor, the theory of immersion of a rotating solid in soil in relation to a drill string has been developed. Resistance forces, arising from the face side, are analytically set depending on the mechanical drilling (sinking) speed and bit rotation frequency, taking into account the strength properties of the rock in the face. When modeling the process of immersion of the column, the possibilities of jamming the translational or rotational movement of the bit, its separation (bouncing) from the rock in the bottom of the well are taken into account. The moments of switching from one drilling mode to another are determined through the dynamic stress arising in the bottom rock, when compared with the static maximum permissible. The introduced single-mass model of the drill string allows one to describe frictional relaxation torsional self-oscillations that occur during drilling. The adopted model takes into account the change in the torsional stiffness of the column as it elongates, the strength properties of the rock, the dynamic nature of the resistance forces, and the influence of the tackle system. For the first time, the arising additional force is taken into account, as a result of large twist angles of the drill string, leading to a decrease in axial pressure on the bit - which is important for deep drilling. The written equations make it possible to mathematically rigorously describe the dynamics of the rotary drilling of vertical wells in a uniform rock layer without any empirical relationships. The model provides the ability to determine the optimal drilling conditions.

Keywords: drilling theory; drill string; torsional self-oscillations; relaxation mode; stick-slip mode; Pade approximation for resistance force; frictional self-oscillations.

Введение. При описании процессов бурения до недавнего времени существовало, по крайней мере, три нерешенных проблемы:

1. Нахождение аналитического выражения для сил сопротивления со стороны забоя в зависимости от кинематических величин [1–5] — что определяет их ди-

намический характер и должно хорошо согласоваться с опытными данными, быть математически корректным при любых значениях механической скорости бурения и частоты вращения долота, включая и нулевые;

2. Описание процессов погружения колонны при углублении скважины, в том числе и при переходных режимах бурения с возможными кратковременными остановками долота или его отскоками от породы в забое скважины;

3. Определение влияния волновых процессов [5–10], возникающих в бурильной колонне, с учетом ее погружения, меняющейся длины и подвижности границ.

Очевидно, что эти проблемы взаимосвязаны. Автору статьи удалось решить лишь первые две из них [11–14]. Были получены такие результаты:

а) в аналитическом выражении для силы сопротивления учтен динамический характер ее изменения, который выражается в виде прямой пропорциональной зависимости от механической скорости бурения и обратной — от частоты вращения долота, в соответствии с опытными данными;

б) теоретически обосновать принятые аналитические выражения для сил сопротивления [15];

с) избежать некорректностей логического и математического характера при всех значениях скоростей погружения и вращения долота, включая и нулевые значения;

д) при наличии экспериментальной характеристики удается наиболее точно аппроксимировать механические прочностные свойства породы в забое;

е) моделировать прерывистость погружения колонны с кратковременными остановками (заклиниванием), что до сих пор в задачах механики удавалось делать только с помощью закона сухого трения;

ф) предельное динамическое напряжение, возникающее в породе забоя, удается выразить через статическое, что позволяет устанавливать простые и ясные условия перехода от состояния заклинивания к режиму погружения колонны и наоборот;

г) удается учитывать меняющуюся степень износа долота в процессе бурения с учетом прочностных свойств породы [11].

Использование Паде аппроксимации послужило отправной точкой и для решения второй проблемы: была создана теория погружения вращающегося твердого тела в сопротивляющуюся среду применительно к задачам бурения [11–15]. Теория позволяет:

✓ описывать переходные режимы бурения с возможными кратковременными остановками и, в частности, обнаруживать режимы детерминированного хаоса для рассматриваемых систем;

✓ определять законы изменения механической скорости из уравнений принятой модели, а не вводить их эмпирически, как это делается в настоящее время;

✓ вводить динамические модели бурильной колонны с конечным и бесконечным числом степеней свободы, с учетом погружения и изменяющихся размеров. Раньше в существующих моделях процесс погружения, а значит и изменение длины колонны, полностью исключался [2; 5–10].

Решение третьей проблемы предполагает создание принципиально новых идей и математических методов

при нахождении решений дифференциальных уравнений в частных производных для распределенных систем, с изменяющимися во времени размерами. Как это было показано в работах А.И. Весницкого и его учеников [16], в непрерывных системах движение границ может существенно влиять на развитие волновых процессов. Опыт нижегородской школы [16] говорит о том, что описание волновых процессов в таких системах весьма сложно даже при известных законах движения границ, и использование стандартных методов математической физики здесь мало помогает. Бурильная колонна — это тоже, строго говоря, распределенная механическая система изменяющейся длины, совершающая вертикальное движение — погружение. Существенно, что закон движения одной из границ — низа бурильной колонны, контактирующей с забоем скважины, заранее неизвестен и предполагает, кроме того, возможные кратковременные остановки или отскоки от забоя скважины. В этом главное отличие рассматриваемой задачи от систем, изучаемых нижегородцами, приводящее к дополнительным сложностям при моделировании процессов бурения. И применение линейного волнового уравнения для задач бурения, строго говоря, будет неправомерно, так как при больших углах закрутки бурильной колонны гипотеза о плоских поперечных сечениях здесь уже неприменима [17].

Заметим при этом, что модели бурильной колонны с конечным числом степеней свободы раньше практически никем серьезно не рассматривались. Объясняется это тем, что, при отсутствии возможности описания процесса погружения на таких моделях, трудно было рассчитывать на получение каких-либо значимых результатов. Переход сразу к распределенным системам, как это исторически сложилось, создавал иллюзию о том, что волновые процессы и без учета погружения бурильной колонны позволят получить ответы на многие вопросы по оптимизации режимов бурения. Такие заблуждения, к сожалению, сохраняются и в наши дни. В существующих работах [2; 6–10] влияние волновых процессов применительно к задачам бурения определяется весьма упрощенно. Делается это всеми авторами одинаково: используются стандартные методы нахождения решений для волнового уравнения без учета процесса погружения и изменения длины колонны, при обычных граничных условиях, когда границы считаются неподвижными; динамический характер сил сопротивления тоже никак не учитывается. При таком подходе, достоверность получаемых результатов по изучению волновых явлений бурильной колонны была сомнительна. Приводимые результаты в этих работах соответствуют не режимам бурения, а случаям заклинивания бурильной колонны, когда углубление забоя не происходит. Практически во всех существующих работах именно таким случаям заклинивания отвечают принимаемые за основу динамические модели [2; 6–10]. В отдельных работах [3–4] предпринимаемые попытки учесть погружение БК не столь успешны.

По мнению автора, в настоящее время появилась возможность на основе созданной теории погружения строить более простые и в то же время более достоверные модели бурильной колонны — с конечным числом степеней свободы. На таких моделях можно изучать

динамические явления в первом приближении, без учета влияния волн, как это обычно и делается на начальном этапе. От полуэмпирических теорий бурения, а их в настоящее время насчитывается 16 [18–20], предлагается переход к построению теории в строгом математическом изложении. Базовые эмпирические соотношения для определения законов изменения механической скорости, определяющие главное отличие существующих теорий, больше не будут нужны. Такие законы в случае необходимости можно будет представлять в графическом виде по результатам численных решений уравнений принятой модели. В последующем основы математически строгой теории могут уточняться при переходе к более точным и общим динамическим моделям бурильной колонны, в том числе и с распределенными параметрами и подвижными границами.

В данной работе для одномассовой модели бурильной колонны математически строго описываются динамические процессы при роторном способе бурения вертикальных скважин в однородном слое породы, с учетом основных факторов, влияющих на бурение. Излагаемый материал является обобщением ранее опубликованной статьи автора [11] на случаи глубокого бурения скважин. Кроме того, удалось обосновать правомерность выбранных аналитических выражений для компонент сил сопротивления — в виде аппроксимаций Паде, что ранее делалось без каких-либо строгих обоснований, эмпирически. Строгие обоснования в решении этого вопроса можно будет найти в недавней публикации автора [15].

Описание модели. Моделируется процесс бурения вертикальных скважин роторным способом в однородном слое породы (грунте). Для описания происходящих динамических процессов будем исходить из одномассовой модели бурильной колонны (БК) и расчетной схемы, изображенных на рисунке ниже. Здесь пружина кручения, имеющая переменную жесткость $c(x)$, вследствие изменения своей длины L_{DS} при углублении скважины отображает упругую часть БК, состоящей из основных бурильных труб; цилиндр — компоновка нижней части БК (КНБК), состоящей в основном из утяжеленных бурильных труб (УБТ), которые будем считать абсолютно жесткими и которые имеют постоянную общую длину $L_{ВНА}$ — жесткая часть БК (DS и ВНА — используемые в англоязычной литературе аббревиатуры соответственно основных бурильных труб и оборудования низа бурильной колонны). Цилиндр с долотом, будем полагать, вращаются как одно целое, обладают общей массой $m_{ВНА}$ и осевым моментом инерции $I_{ВНА}$. Кроме того, приняты следующие обозначения: t — текущее время; ω — постоянная угловая скорость ротора в устье скважины; x — координата, определяющая углубление забоя скважины по отношению к устью; φ — абсолютный угол закрутки для нижнего сечения упругой части БК. На долото со стороны забоя действуют момент M_c и сила F_c сопротивления. Учтено действие момента сил вязкого сопротивления M_b со стороны промывочной жидкости на долото; согласно [6] примем, что $M_b = a\dot{\varphi}^2$, где a —

коэффициент вязкого сопротивления, зависящий от расхода промывочной жидкости (давления) и концентрации шлама в ней. Здесь и далее точкой обозначается производная по времени t . P — вес груза, создающий постоянное натяжение каната талевой системы и предназначенный для регулирования (разгрузки) осевого давления, оказываемого на долото весом БК; кроме того, предполагается, что со стороны пружины кручения (упругой части БК) действует добавочное продольное усилие ΔP . Физическая природа усилия ΔP заключается в том, что при больших углах закрутки пружина кручения стремится уменьшить свои продольные размеры. Скручивание пружины носит стесненный характер, поэтому вместо укорочения пружины кручения возникает дополнительное продольное усилие [17; 2]:

$$\Delta P = \frac{E_{DS} J_{DS}}{2L_{DS}^2} (\varphi - \omega t)^2,$$

где E_{DS}, J_{DS} — соответственно модуль упругости материала и момент инерции поперечного сечения основных бурильных труб БК.

Упругий момент со стороны упругой части БК (пружины), передающийся на долото, введем в соответствии с законом Гука:

$$M = -c(\varphi - \omega t),$$

где t — текущее время; $c = c(x)$ — переменная крутильная жесткость, определяемая по формуле:

$$c(x) = \frac{GJ_{\rho}}{x - L_{ВНА}},$$

где G, J_{ρ} — соответственно модуль сдвига и полярный момент инерции поперечного сечения для обычных бурильных труб; разность $x - L_{ВНА} = L_{DS}$ определяет изменяющуюся длину упругой верхней части колонны, состоящей из основных бурильных труб, на текущий момент бурения.

Принимая во внимание, что угловая скорость может иметь произвольный знак, а линейная скорость погружения всегда положительна, при контакте долота с забоем аналитическая зависимость для силы сопротивления берется в виде аппроксимации Паде такого вида [11–14]:

$$F_c = F_0 \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\varphi}| + \Delta}.$$

Здесь b, Δ — коэффициенты полиномиальных членов аппроксимации Паде, через которые определяются прочностные свойства породы, и при этом предполагается, что их значения определяются на основании экспериментальных данных; R — радиус долота (характерный размер пятна контакта долота с забоем); F_0 — коэффициент пропорциональности, подлежащий определению. Момент сил сопротивления вращению породоразрушающего инструмента со стороны забоя, согласно современному представлению [1], равен $M_c = \rho F_c$, т. е.:

$$M_c = \rho F_0 \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\varphi}| + \Delta},$$

где ρ – удельный момент сопротивления на единицу давления в забое, имеющий физическую природу, близкую к коэффициенту трения скольжения, который, будем полагать, изменяется согласно закону Кулона:

$$\rho = \rho_0 \text{sign } \dot{\varphi}, \text{ при } \dot{\varphi} \neq 0; [-\rho_1, \rho_1], \text{ при } \dot{\varphi} \equiv 0.$$

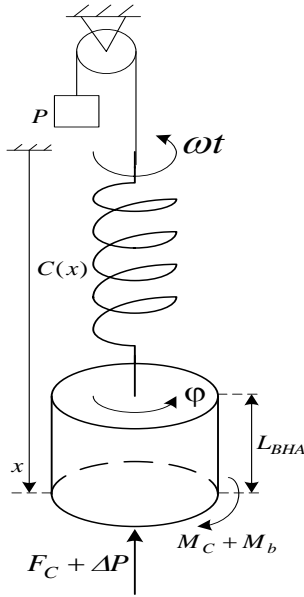


Рис. Динамическая модель буровой колонны

Будем полагать, что запас прочности породы в забое определяется как $n_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}$; где σ_0, σ_1 — статические

напряжения, возникающие в породе забоя, создаваемые собственным весом БК и предельно допустимой нагрузкой, необходимой для начала разрушения породы при углублении скважины.

Вариант построения строгой теории бурения. Рассматривается процесс погружения буровой колонны в однородном слое породы с учетом возможностей того, что погружение колонны и вращение долота могут чередоваться с кратковременными остановками по отдельности или одновременно, что предполагает возможности кратковременных заклиниваний, а также возможностями отрыва (отскока) долота от породы в забое. Отметим, что в момент возможного отрыва долота от породы забоя, текущая глубина погружения x_{**} находится из условия:

$$f(x, \varphi) = 0,$$

где $f(x, \varphi) = 1 - \frac{P}{mg} - \Delta P$ — функция влияния, которая

определяет, какая часть от силы тяжести БК давит на забой в текущий момент времени. Запишем уравнения движения БК (рис. 1), отвечающие следующим кинематическим состояниям долота:

1. Погружения с кратковременными остановками в поступательном и вращательном движениях долота:

$$x \geq x_{**} \text{ и } f(x, \varphi) > 0: \begin{cases} \dot{x} \equiv 0, \text{ при } \frac{n_1}{f(x, \varphi)} > 1 \text{ и } |\dot{\varphi}| < \frac{\Delta}{bR} \left[\frac{n_1}{f(x, \varphi)} - 1 \right]; \\ \ddot{x} = g \left[f(x, \varphi) - n_1 \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\varphi}| + \Delta} \right], \text{ при } \dot{x} \geq 0; \\ \dot{\varphi} \equiv 0, \text{ при } \frac{G_{DS} J_{DS} |\varphi - \omega t|}{x - L_{BHA}} < \begin{cases} r\rho_1 mg, \text{ при } \frac{n_1}{f(x, \varphi)} > 1 \text{ и } \dot{x} \equiv 0; \\ n_1 \rho_1 mg, \text{ при } \dot{x} \geq 0; \end{cases} \\ I_{BHA} \ddot{\varphi} + b\dot{\varphi}^2 \text{sign } \dot{\varphi} + \frac{G_{DS} J_{DS} (\varphi - \omega t)}{x - L_{BHA}} = \begin{cases} -r\rho_0 mg \text{sign } \dot{\varphi}, \text{ при } \frac{n_1}{f(x, \varphi)} > 1 \text{ и } \dot{x} \equiv 0; \\ -n_1 \rho_0 mg \frac{\dot{x} + \Delta}{\dot{x} + bR|\dot{\varphi}| + \Delta} \text{sign } \dot{\varphi}, \text{ при } \dot{x} \geq 0. \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

2. Отрыва долота от забоя (подпрыгивание):

$$x < x_{**}: \begin{cases} \ddot{x} = gf(x, \varphi), \text{ при } \forall \dot{x}; \\ I_{BHA} \ddot{\varphi} = -b\dot{\varphi}^2 \text{sign } \dot{\varphi} - \frac{G_{DS} J_{DS} (\varphi - \omega t)}{x - L_{BHA}}, \text{ при } \forall \dot{x}; \end{cases} \quad (2)$$

Остановка погружения будет происходить, когда одновременно:

$$\dot{x} = 0, f(x, \varphi) > 0, \frac{n_1}{f(x, \varphi)} > 1 \text{ и } |\dot{\varphi}| < \frac{\Delta}{bR} \left[\frac{n_1}{f(x, \varphi)} - 1 \right], \quad (3)$$

а окончание вращательного движения долота — когда одновременно:

$$\dot{\varphi} = 0, f(x, \varphi) > 0 \text{ и } \frac{G_{DS} J_{DS} |\varphi - \omega t|}{x - L_{BHA}} \leq \begin{cases} \rho_0 r mg, \text{ при } \frac{n_1}{f(x, \varphi)} > 1 \text{ и } \dot{x} \equiv 0; \\ \rho_0 n_1 mg, \text{ при } \dot{x} \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Далее перейдем к безразмерным переменным:

$$\tau = \sqrt{\frac{G_{DS} J_{DS}}{I_{BHA} L_{BHA}}} t; \quad \xi = \frac{G_{DS} J_{DS}}{\rho_0 m g L_{BHA}} (\varphi - \omega t); \quad \eta = \frac{x}{L_{BHA}}$$

и параметрам:

$$\Omega = \frac{1}{\rho_0 m g} \sqrt{\frac{I_{BHA} G_{DS} J_{DS}}{L_{BHA}}} \omega; \quad \chi = \frac{g I_{BHA}}{G_{DS} J_{DS}}; \quad r = 1 - \frac{P}{m g}; \quad f(\eta, \xi) = r - \frac{m g E_{DS}}{2 J_{DS}} \left(\frac{\rho_0}{G_{DS}} \right)^2 \left(\frac{\xi}{\eta - 1} \right)^2;$$

$$\beta = \frac{a \rho_0 m g L_{BHA}}{I_{BHA} G_{DS} J_{DS}}; \quad \delta = \sqrt{\frac{I_{BHA}}{G_{DS} J_{DS} L_{BHA}}} \Delta; \quad \alpha = \frac{b \rho_0 m g R}{G_{DS} J_{DS}}; \quad \varepsilon = \frac{\rho_1}{\rho_0}.$$

Обозначив точкой производную уже по времени τ , запишем в безразмерном виде уравнения (1) – (4) движения БК (см. рисунок), которые отвечают следующим кинематическим состояниям долота:

1. Погружения с кратковременными остановками в поступательном и вращательном движениях долота:

$$\eta > \eta_{**} \text{ и } f(\eta, \xi) > 0: \quad \begin{cases} \dot{\eta} \equiv 0, \quad \text{при } \frac{n_1}{f(\eta, \xi)} > 1 \text{ и } |\dot{\xi} + \Omega| < \frac{\delta}{\alpha} \left[\frac{n_1}{f(\eta, \xi)} - 1 \right]; \\ \ddot{\eta} = \chi \left[f(\eta, \xi) - n_1 \frac{\dot{\eta} + \delta}{\dot{\eta} + \alpha |\dot{\xi} + \Omega| + \delta} \right], \quad \text{при } \dot{\eta} \geq 0; \\ \dot{\xi} \equiv -\Omega, \quad \text{при } \frac{|\xi|}{\eta - 1} < \begin{cases} r \varepsilon, \quad \text{при } \frac{n_1}{f(\eta, \xi)} > 1 \text{ и } \dot{\eta} \equiv 0; \\ n_1 \varepsilon \left(1 + \frac{\dot{\eta}}{\delta} \right), \quad \text{при } \dot{\eta} \geq 0; \end{cases} \\ \ddot{\xi} + \beta (\dot{\xi} + \Omega)^2 \text{sign}(\dot{\xi} + \Omega) + \frac{\xi}{\eta - 1} = \begin{cases} -r \text{sign}(\dot{\xi} + \Omega), \quad \text{при } \frac{n_1}{f(\eta, \xi)} > 1 \text{ и } \dot{\eta} \equiv 0; \\ -n_1 \frac{\dot{\eta} + \delta}{\dot{\eta} + \alpha |\dot{\xi} + \Omega| + \delta} \text{sign}(\dot{\xi} + \Omega), \quad \text{при } \dot{\eta} \geq 0. \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

2. Отрыва долота от забоя (подпрыгивание):

$$\eta \leq \eta_{**}: \quad \begin{cases} \ddot{\eta} = \chi f(\eta, \xi), \quad \text{при } \forall \dot{\eta}; \\ \ddot{\xi} = -\beta (\dot{\xi} + \Omega)^2 \text{sign}(\dot{\xi} + \Omega) - \frac{\xi}{\eta - 1}, \quad \text{при } \forall \dot{\eta}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь также учтено, что в момент отрыва долота глубина η_{**} находится из условия: $f(\eta, \xi) = 0$, где $f(\eta, \xi)$ — функция влияния в безразмерном виде. Остановка погружения будет происходить, когда одновременно:

$$\dot{\eta} = 0, \quad \frac{n_1}{f(\eta, \xi)} > 1 \text{ и } |\dot{\xi} + \Omega| < \frac{\delta}{\alpha} \left[\frac{n_1}{f(\eta, \xi)} - 1 \right], \quad (7)$$

а окончание вращательного движения долота — когда одновременно:

$$\dot{\xi} = -\Omega, \quad f(\eta, \xi) > 0 \text{ и } \frac{|\xi|}{\eta - 1} \leq \begin{cases} r, \quad \text{при } \frac{n_1}{f(\eta, \xi)} > 1 \text{ и } \dot{\eta} \equiv 0; \\ n_1, \quad \text{при } \dot{\eta} \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Каждый отрыв долота от забоя завершается упруго-пластическим ударом. Введение динамического напряжения через частоту вращения долота позволяет определять прочность породы, учитывая динамику воздействия породоразрушающего инструмента. Такой подход дает возможность определять моменты окончаний возможных кратковременных остановок (заклиниваний) долота при погружении [11–14], что ранее не удавалось. Применение аппроксимации Паде позволяет это делать предельно ясно и просто.

Заключение. Приведенная модель (см. рисунок), являющаяся обобщением ранее введенной в работе [11], позволяет:

1. Рассматривать решения уравнений (1) – (2) с учетом условий (3) – (4) (или их безразмерный аналог (5) – (8)) как один из возможных вариантов построения строгой теории бурения, которую можно будет брать за основу для последующих уточнений и развития теории.

2. Получить новую одномассовую динамическую модель БК для описания крутильных автоколебаний релаксационного типа с учетом процесса погружения

по мере углубления однородного забоя скважины при вращательном способе глубокого бурения.

3. Проводить численное моделирование крутильных автоколебаний БК, когда наряду с обычными режимами обнаруживаются процессы, присущие детерминированному хаосу — хаотичные режимы бурения.

Модель предусматривает возможности кратковременных заклиниваний (остановок) в поступательном и (или) вращательном движениях долота, а также режимы безостановочного бурения. Учитываются: переменная крутильная жесткость колонны, влияние натяжения каната талевой системы и действие промывочной жидкости. Результаты численного моделирования бурения в однородном слое породы — нахождение решений уравнений (1) – (2) с учетом условий (3) – (4) — позволяют установить:

а. Уменьшение крутильной жесткости колонны по мере углубления скважины может приводить к уменьшению частоты вращения долота и механической скорости бурения.

б. Уменьшение крутильной жесткости колонны по мере углубления скважины приводит, как правило, к возникновению релаксационных режимов бурения.

с. Вязкое сопротивление при увеличении расхода промывочной жидкости может приводить к затуханию релаксационного режима бурения — к уменьшению длительности возможных режимов «stick – slip» (остановка – скольжение), проявляется как бы «эффект смазки».

д. Вязкое сопротивление может способствовать увеличению механической скорости бурения — по-видимому, из-за затухания релаксационного режима.

е. Значения для оптимального осевого давления на долото, частоты вращения долота, длины утяжеленных труб КНБК — в настоящее время они определяются без каких-либо строгих обоснований, на основе имеющегося опыта ведения буровых работ или пробного бурения. Эти значения изменяются в зависимости от механических свойств породы в забое, глубины бурения и должны периодически проверяться.

ф. Сочетание нежелательное значений основных параметров, приводящее к возникновению динамической неустойчивости процесса бурения в виде детерминированного хаоса — хаотичных режимов [11–14].

г. Правомерность общепринятых эмпирических соотношений изменения скорости погружения БК, используемых в теориях бурения [18–20].

Литература

1. Нагаев Р.Ф., Исаков К.А., Лебедев Н.А. Динамика горных машин. СПб.: Изд-во СПбГИ (ТУ), 1996. 155 с.
2. Белокобыльский С.В. Динамика систем с сухим трением и ее приложение к задачам горной механики. М.: Машиностроение, 2002. 209 с.
3. Нургалеев А.Р., Тихонов В.С. Численное моделирование колебаний КНБК в режиме stick-slip при бурении долотами PDC // Нефть. Газ. Новации. 2011. № 1 (144). С. 12–15.
4. Пальмов В.А., Ветюков Ю.М. Неравномерное вращение бурильной колонны, обусловленное существенно нелинейным взаимодействием долота со скальной породой // Науч.-технические ведомости СПбГТУ, 2003. № 4. С. 51–56.
5. Погорелов Д.Ю., Лысыков Н.Н. Силы взаимодействия долота с породой при компьютерном моделировании динамики бурильной колонны // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2019. № 3. С. 211–236.
6. Балицкий П.В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. М.: Недра, 1975. 293 с.
7. Керимов З.Г. Динамические расчеты бурильной колонны. М.: Недра, 1970. 160 с.
8. Юнин Е.К., Хегай В.К. Динамика глубокого бурения. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 286 с.
9. Юнин Е.К. Автоколебания в глубоком бурении. М.: Либроком, 2013. 264 с.
10. Юнин Е.К. Низкочастотные колебания бурильного инструмента. М.: Недра, 1983. 132 с.
11. Коронатов В.А. Начала построения строгой теории бурения // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4 (32). С. 83–94.
12. Коронатов В.А. Элементы строгой теории бурения // Математика, ее приложения и математическое образование (МПО17): материалы VI Междунар. конф. Улан-Удэ, 2017. С. 221–226.
13. Коронатов В.А. Новый метод описания процесса бурения скважин и обнаружение режимов детерминированного хаоса // Проблемы механики современных машин: материалы VI Междунар. конф. / отв. ред. В.С. Балбаров. Улан-Удэ. 2015. С. 127–140.
14. Коронатов В.А. Релаксационные крутильные автоколеба-

ния бурильной колонны при вибровращательном способе углубления забоя скважины. // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 39–48.

15. Коронатов В.А. Общий подход к определению сил сопротивления при качении, скольжении тел с верчением, бурении, проникании, сверлении и заглаживании // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 24–32.
16. Весницкий А.И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
17. Ишлинский А.Ю. О напряженном состоянии упругого цилиндра при больших углах крутки // Прикладная математика и механика. 1943. Т. 7. Вып. 3. С. 223–225.
18. Синеев С.В. Модели процесса бурения и их практическое использование // Вестн. Ассоциации буровых подрядчиков. 2009. № 3. С. 35–44.
19. Синеев С.В. Режимы бурения и особенности дифференциального давления в формировании механической скорости // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2012. № 3. С. 7–14.
20. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения. М., Гостехиздат, 1958, 215 с.

Literature

1. Nagaev R.F., Isakov K.A., Lebedev N.A. Dynamics of mining machines. SPb.: Izd-vo SPPGI (TU), 1996. 155 p.
2. Belokobyl'skij S.V. Dynamics of systems with dry training and its application to the tasks of mining mechanics. M.: Mashinostroenie, 2002. 209 p.
3. Nurgaleev A.R., Tihonov V.S. Numerical simulation of BHA vibrations in stick-slip mode when drilling with PDC bits // Neft'. Gaz. Novacii. 2011. № 1 (144). P. 12–15.
4. Pal'mov V.A., Vetyukov YU.M. Uneven rotation of the drill string due to substantially non-linear interaction of the bit with the rock // Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Technical University. 2003. № 4. P. 51–56.
5. Pogorelov D.YU., Lysikov N.N. The forces of interaction between the bit and the rock during computer simulation of the dynamics of the drill string // Neftegazovoe delo: elektron. zhurn. 2019. № 3. P. 211–236.
6. Balickij P.V. The interaction of the drill string with the bottom of the well. M.: Nedra, 1975. 293 p.

7. Kerimov Z.G. Dynamic calculations of the drill string. M.: Nedra, 1970. 160 p.
8. YUnin E.K., Hegaj V.K. The dynamics of deep drilling. M.: Nedra-Biznescentr, 2004. 286 p.
9. YUnin E.K. Self-oscillations in deep drilling. M.: LIBRO-KOM, 2013. 264 p.
10. YUnin E.K. Low-frequency vibrations of a drilling tool. M.: Nedra, 1983. 132 p.
11. Koronatonov V.A. The beginning of the construction of a rigorous theory of drilling // Systems. Methods. Technologies. 2016. № 4 (32). P. 83–94.
12. Koronatonov V.A. Elements of a rigorous theory of drilling // Matematika, ee prilozheniya i matematicheskoe obrazovanie (MPMO17): materialy VI Mezhdunar. konf. Ulan-Ude, 2017. P. 221–226.
13. Koronatonov V.A. A new method for describing the process of drilling wells and detecting deterministic chaos modes // Problemy mekhaniki sovremennyh mashin: materialy VI Mezhdunar. konf. / otv. red. V.S. Balbarov. Ulan-Ude. 2015. P. 127–140.
14. Koronatonov V.A. Relaxation torsional self-oscillations of the drill string with the vibration-rotation method of deepening the bottom of the well // Systems. Methods. Technologies. 2016. № 2 (30). P. 39–48.
15. Koronatonov V.A. A general approach to determining the resistance forces during rolling, sliding of bodies with turning, drilling, penetration, drilling and smoothing // Systems. Methods. Technologies. 2018. № 3 (39). P. 24–32.
16. Vesnickij A.I. Waves in systems with moving boundaries and loads. M.: Fizmatlit, 2001. 320 p.
17. Ishlinskij A.YU. On the stress state of an elastic cylinder at large twist angles // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1943. V. 7. Vyp. 3. P. 223–225.
18. Sineev S.V. Models of the drilling process and their practical use // Bulletin of the Association of Drilling Contractors. 2009. № 3. P. 35–44.
19. Sineev S.V. Drilling regimes and features of differential pressure in the formation of mechanical speed // Construction of oil and gas wells by land and by sea. 2012. № 3. P. 7–14.
20. Fedorov V.S. Designing drilling modes. M., Gostoptekhzdat, 1958, 215 p.