

УДК 534.01; 622.24.053

## Численное моделирование релаксационных крутильных автоколебаний бурильной колонны во время проходки — углубления забоя скважины

В.А. Коронатов

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия  
kortavik@mail.ru

Статья поступила 16.03.2015, принята 11.05.2015

*Принципиально новая одномассовая модель бурильной колонны, разработанная автором, в отличие от всех существующих, учитывает процесс проходки и позволяет численно моделировать крутильные автоколебания, возникающие при бурении скважин. Исследуются релаксационные режимы, когда погружение бурильной колонны и вращение долота могут чередоваться с длительными остановками. Аналитические зависимости для силы и момента сопротивления, возникающие со стороны забоя скважины, задаются, в зависимости от линейной скорости погружения и угловой скорости вращения долота, через аппроксимацию Паде. Предполагается, что значения полиномиальных коэффициентов для многочленов первой степени, через отношение которых задается аппроксимация, определяются из реальной характеристики для силы сопротивления, получаемой экспериментально для породы, в которой производится бурение скважины, и они определяют прочностные свойства породы забоя. Метод академика РАН В.Ф. Журавлева по определению поликомпонентного трения через Паде аппроксимацию, применяемый при описании скольжения тел с вращением по шероховатой плоскости, обобщен автором статьи на задачи бурения (задачи погружения вращающегося тела в сопротивляющуюся среду) при определении силы, а через нее и момента сопротивления. В данной работе для коэффициента удельного момента сопротивления, приходящегося на единицу давления со стороны забоя, по аналогии с коэффициентом сухого трения, принимается нелинейная кубическая характеристика. Новая динамическая модель бурильной колонны позволяет определять скорость и глубину проходки — важнейшие показатели эффективности бурения — не эмпирически, как это было до сих пор, а исходя из уравнений самой динамической модели, ее параметров и прочностных свойств породы забоя. Ранее определение этих характеристик процесса бурения было абсолютно невозможно, так как существующие модели не учитывают процесс проходки. Скорость и глубина проходки определялись только в виде эмпирических зависимостей, полученных, как правило, экспериментальным путем либо в стендовых, либо в промышленных условиях. Численное моделирование переходного режима автоколебаний показало, что наряду с возможными установившимися периодическими режимами могут возникать и режимы детерминированного хаоса. В случае детерминированного хаоса фазовая траектория притягивается к странному аттрактору, а весьма малые изменения в начальных условиях приводят к существенным изменениям в работе системы, практически непредсказуемым в процессе бурения. Обнаружение режимов детерминированного хаоса является доказательством существующего предположения о возможности хаотичных процессов, возникающих при бурении нефтяных и газовых скважин.*

**Ключевые слова:** бурильная колонна; проходка; забой скважины; сопротивляемость породы; релаксационные, крутильные, автоколебания; переходный режим; поликомпонентное трение; метод В.Ф. Журавлева; аппроксимация Паде; детерминированный хаос.

## Numerical simulation of relaxation torsional self-oscillation of a drill string during penetration – bottom-hole deepening

V.A. Koronotov

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia  
kortavik@mail.ru

Received 16.03.2015, accepted 11.05.2015

*Fundamentally new single-mass model of a drill string, developed by the author, in contrast to all existing, takes into accounts the process of penetration and allows simulating numerically torsional self-oscillations occurring during hole drilling. Relaxation modes have been studied when immersion of the drill string and bit rotation may alternate with long stops. Analytical dependences for the force and torque resistance arising from the bottom of the hole are set, depending on the linear velocity and angular velocity of rotation via Pade approximation. It is assumed that the values of polynomial coefficients for polynomials of the first degree, which is defined as the ratio of approximation, are determined from the actual characteristics of the resistance force obtained experimentally for the rock drilled, and they determine the mechanical properties of the rock. The method of Academician V.F. Zhuravlev, proposed to determine multicomponent friction when describing sliding motion of bodies with spinning on a rough plane, is generalized to the*

problem of drilling (penetration) when determining the strength, and through it, determining the moment of resistance from the downhole. In this study, for the coefficient of the specific moment of resistance per unit of pressure from the bottom, similar to the coefficient of dry friction, cubic nonlinear characteristic is taken. The new dynamic model of the drill string allows determining the speed and depth of penetration (which are the most important drilling performance indicators) non-empirically, as it was until now, but on the basis of the equations of the dynamic model, its parameters and strength properties of the rock. Determination of these characteristics was impossible earlier, because the existing models do not take into account the process of penetration. The speed and depth of penetration were determined only in the form of empirical relationships obtained usually by experimentation either in bench or in industrial environment. Numerical simulation of transitional regime of self-oscillations has shown that along with the other possible periodic regimes, modes of determined chaos can also occur. In the case of determined chaos phase trajectory is attracted to the strange attractor, and very small changes in initial conditions lead to substantial changes in the system, almost unpredictable in the drilling process. Finding out the modes of determined chaos prove the assumption about the possibility of chaotic processes occurring when drilling oil and gas wells.

**Key words:** drill string; excavation; downhole; resistance of the rock; relaxation, torsional and self-oscillations; transitional regime; multicomponent friction; V.F. Zhuravlev's method; Pade approximation; determined chaos.

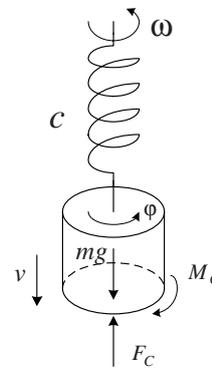
**Введение.** В данной работе автор на основе ранее разработанной им принципиально новой одномассовой динамической модели бурильной колонны [6; 7], учитывающей, в отличие от всех существующих на сегодняшний день моделей, процесс проходки, численно исследует переходный режим крутильных автоколебаний, возникающих при бурении скважин. Исследовался релаксационный режим, когда погружение бурильной колонны и вращение долота могут чередоваться с длительными остановками. По сравнению с работами [6; 7], где исследование крутильных автоколебаний делалось при упрощенной кусочно-линейной зависимости, для коэффициента удельного момента сопротивления (по закону Кулона), приходящегося на единицу давления со стороны забоя, в данной работе берется более общая нелинейная зависимость в виде кубического полинома. Помимо обычных параметров бурения, здесь определяются линейная скорость поступательной составляющей движения колонны и глубина проходки. Еще раз подчеркнем, что традиционным моделям бурильной колонны определение скорости и глубины проходки недоступно, так как они не учитывают сам процесс погружения в забое скважины (см., например, [1–5, 15–18]).

Новая динамическая модель, введенная в работах [6; 7], предполагает начало качественно нового этапа в развитии теории динамики бурильной колонны, учитывающей саму проходку и возможности определения скорости и глубины проходки не эмпирически, как это было до сих пор, а исходя из уравнений динамической модели, ее параметров и прочностных свойств породы забоя.

**Постановка задачи.** За основу берется одномассовая модель бурильной колонны, введенная в работах [6; 7] (рис. 1).

Верхнее сечение колонны закручивается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , а в нижнем сечении, угол закручивания которого  $\varphi$ , имеется долото, изображенное в виде цилиндра, на который со стороны забоя действуют момент  $M_c$  и сила  $F_c$  сопротивления ( $m$  – масса, обычно отождествляемая с массой утяжеленной части колонны;  $I$  – момент инерции поперечного сечения колонны;  $R$  –

характерный размер пятна контакта долота с забоем);  $v$  – скорость погружения бурильной колонны (скорость проходки) при углублении забоя скважины.



**Рис. 1.** Динамическая модель бурильной колонны во время проходки — углубления забоя скважины

Учитывая, что относительный угол закручивания  $\psi = \varphi - \omega t$  нижнего сечения бурильной колонны по отношению к верхнему обычно достаточно велик, упругий момент со стороны колонны (пружины), передающийся на долото, введем в следующем нелинейном виде:  $M = -c[(\varphi - \omega t) + \beta(\varphi - \omega t)^3]$ , где  $t$  – текущее время,  $c, \beta$  – константы, определяющие упругие свойства колонны (при  $\beta = 0$  упругий момент будет изменяться согласно закону Гука).

Аналитическая зависимость для силы сопротивления со стороны забоя скважины берется в виде Паде аппроксимации согласно обобщенному методу В.Ф. Журавлева [6; 7]. Принимая во внимание, что угловая скорость может иметь произвольный знак, а линейная скорость всегда положительна, будем полагать:

$$F_c = F_0 \frac{v + \Delta}{v + bR \left| \frac{d\varphi}{dt} \right| + \Delta}. \quad (1)$$

Здесь  $b, \Delta$  – коэффициенты полиномиальных членов аппроксимации Паде, которые устанавливаются из реальных характеристик для силы сопротивления породы, в которой осуществляется бурение скважины,