

УДК 534.01; 622.24.053

Новая динамическая модель бурильной колонны и численное описание крутильных автоколебаний во время проходки — углубления забоя скважины

В.А. Коронатов

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

kortavik@mail.ru

Статья поступила 30.12.2014, принята 20.02.2015

Предлагается принципиально новая одномассовая динамическая модель бурильной колонны. В отличие от всех существующих данная модель учитывает не только взаимодействие колонны с забоем скважины, но и сам процесс углубления забоя скважины, т. е. проходку (погружение). Модель позволяет описывать крутильные автоколебания, возникающие в процессе бурения скважин, и определять глубину и скорость проходки — важнейшие показатели эффективности бурения. Ранее с помощью традиционных моделей как с конечным числом степеней свободы, так и с распределенными параметрами, описание проходки и определение глубины и скорости погружения бурильной колонны не представлялись возможными. Скорость проходки, если и принималась во внимание в отдельных работах, то лишь в виде эмпирических зависимостей, полученных, как правило, экспериментальным путем либо в стендовых, либо в промышленных условиях. Традиционные модели позволяют описывать только сам процесс взаимодействия породоразрушающего инструмента с забоем скважины, без учета проходки, и фактически являются «стоячими». Прежние модели превращаются в частные случаи работы новой динамической модели или ее модификации — при заклинивании породоразрушающего инструмента (долота) в поступательном движении. Описание процесса проходки в новой модели становится возможным за счет удачного представления силы сопротивления — через Паде аппроксимацию реальных характеристик забоя скважины в зависимости от скорости проходки и угловой скорости вращения долота. Метод академика РАН В.Ф. Журавлева, предложенный для определения поликомпонентного трения при описании скольжения тел с верчением по шероховатой плоскости, обобщается на задачи бурения (погружения) при определении силы, а через нее и момента сопротивления со стороны забоя скважины. Получена формула для нахождения динамического предельного напряжения породы на погружение, определяющая падение динамической сопротивляемости забоя при бурении по мере роста угловой скорости вращения долота (увеличения динамического воздействия). Выбрав другой вид Паде аппроксимации по сравнению с тем, как это сделано в работах В.Ф. Журавлева, становится возможным также описывать не только безостановочные автоколебания, возникающие при проходке бурильной колонны, но и релаксационные, когда вращение долота и проходка бурильной колонны могут чередоваться с длительными остановками (заклиниванием). Последние, как показывают наблюдения, возникают при бурении скважин достаточно часто. Путем численного интегрирования дифференциальных уравнений изучался переходный режим релаксационных крутильных автоколебаний. В зависимости от параметров новой динамической модели приведены примеры результатов численного счета, которые представлены в виде графиков: изменения от времени линейной скорости проходки и угловой скорости вращения долота; изменения глубины погружения бурильной колонны. Показаны также фазовые траектории в трехмерном пространстве фазовых переменных, которые, как показывают численные расчеты, притягиваются либо к регулярному аттрактору, что говорит об установлении периодических режимов автоколебаний, либо к хаотичному странному аттрактору. Последний случай говорит о возможности установления детерминированного хаоса, что впервые фиксируется в динамике бурильной колонны. Новая динамическая модель предполагает начало качественно нового этапа в развитии теории динамики бурильной колонны, учитывающей и саму проходку.

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

New dynamic model of a drill string and numerical description of torsional self-oscillations during penetration – bottom-hole deepening

V.A. Koronotov

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

kortavik@mail.ru

Received 30.12.2014, accepted 20.02.2015

A new single-weight dynamic model of a drill string has been presented. Unlike of those already existed, it takes into account not only interaction of a drill string with the downhole but also the process of drill-string advancement (penetration). The model allows describing torsional oscillations during well drillings and determining the penetration depth and rate – the most important indicators of drilling efficiency. Previously, by using traditional models with a finite number of degrees of freedom and ones with distributed

parameters, description and definition of penetration depth and rate of the drill string were not possible. Rate of drilling, if taken into account in individual works, was presented only in the form of empirical relationship obtained, as a rule, experimentally in the bench or industrial environments. Traditional models allow describing only the process of interaction between a rock-cutting tool and downhole, without penetration taken into account, and in fact they are stagnant. Previous models are transformed into special cases of the new dynamic model or its modifications – when jamming a rock-cutting tool (bit) in progressive advance. Description of the penetration process for the new model becomes possible due to presenting a resistance force in a right way – actual downhole characteristics through the Pade approximation, depending on the penetration rate and angular velocity of a bit rotation. 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. The formula has been received to compute the dynamic stress limit of ground under penetration. When drilling with increasing angular rotation rate of a bit (increasing the dynamic effects), such formula defines the fall of dynamic resistance of the downhole. Having selected another type of Pade approximation, compared with the one used in V.F. Zhuravlev's works, it becomes possible to describe not only non-stop oscillations arising in the process of drill-string advancement, but also relaxation ones, when the rotation of the drill bit and drill-string advance can be interleaved with long stops (jamming). As observations have shown, the last ones often arise in the process of drilling. By numerical integration of differential equations, a transition mode of torsional relaxation self-oscillations has been studied. Depending on the new dynamic model parameters, the examples of the numerical results have been presented as graphs: linear change of penetration rate and angular velocity of bit rotation with time passing; changing the penetration depth for the drill string. Phase trajectories have been shown in three-dimensional space of phase variables. According to numerical calculations, they are usually drawn either to the regular attractor, which indicates the establishment of periodic self-oscillation modes, or to chaotic strange attractor. The latter case means the possibility of establishing determined chaos that is fixed in the drill string dynamics for the first time. New dynamic model assumes a qualitatively new stage in the development of the theory of the drill string dynamics, with drill-string advancement taken into account.

Key words: drill string; penetration; downhole; ground resistance; relaxation oscillations; torsional oscillations; transition mode; multicomponent friction; V.F. Zhuravlev method; Pade approximation; determined chaos.