

УДК 552.141

Т. МЕНДЕБАЕВ, Н. СМАШОВ, М. КОНАРБАЕВ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Ұңғы бұрғылау жұмыстарындағы тау-кен жыныстарын тесу үлгісінің теориялық негіздері жасалынғаны туралы айтылады.

Үлгіде ұңғы бұрғылауда қолданылатын қашаулардың түрлеріне, жұмыс тәртібіне байланысты жиілігі жоғары және төмен тербелістердің пайда болуы, айналмалы қозғалыстапайда болатын кедергілердің мәндері келтірілген.

Представлена теоретическая модель разрушения горных пород при бурении скважин. В зависимости от конструктивных особенностей инструментов и режима бурения приведены выведенные функциональные зависимости реакции забоя и момента сопротивления разрушению горных пород в области высокочастотных и низкочастотных колебаний, где эффективный радиус сопротивления играет роль коэффициента трения.

A theoretical model of rocks destruction when drilling wells is presented. Depending on constructive peculiarities of tools and drilling regime of functional relationship of a pit face reaction and a moment of resistance of rocks destruction in high and low frequency vibration, where the effective radius of resistance plays the part of friction coefficient, has been determined.

Буровой снаряд представляет собой осесимметричное твердое тело, перемещающееся в глубь забоя бурящейся скважины вдоль своей оси с одновременным вращением вокруг неё. За счёт вращения колонны бурильных труб и передачи через неё нагрузки на исполнительный орган бурового снаряда (коронка, долото) разрушается порода забоя под действием буровых резцов (алмазных, твердосплавных и т.п.), расположенных на концентрических окружностях по торцу инструмента. При этом угловое расстояние между соседними резцами в ряду (по концентрической окружности) остается постоянным в течение всего времени работы породоразрушающего инструмента. Произвольно выделенный резец перемещается по поверхности забоя, сформированной предшествующими резцами, таким образом, что время τ , через которое абсолютная угловая координата резца станет равной угловой координате предшествующего резца, удовлетворяет соотношению (см. рис. 1):

$$\varphi(\tau) - \varphi(t - \tau) = \alpha \quad (1)$$

где φ - угловая координата как функция времени; t - реальное время; α - угловое расстояние меж-

ду соседними резцами: $\alpha = \frac{2\pi}{z}$, z - число резцов на линии резания (средней окружности).

Для случая равномерного вращения бурового снаряда (равномерного движения резца по забою) имеем

$$\tau = \frac{\alpha}{\omega}, \quad (2)$$

где ω - угловая скорость вращения бурового снаряда.

Толщина слоя породы, разрушаемого резцом в ходе его перемещения по забою, равна (рис. 1):

$$h = x(t) - x(t - \tau), \quad (3)$$

где x - продольное смещение бурового снаряда вдоль оси скважины.

Если движение бурового снаряда имеет равномерный характер, то $x = vt$, где v - механическая скорость бурения. Тогда, согласно выражениям (2) и (3), получим; $h = v\tau = \alpha \frac{v}{\omega}$. (4)

В общем случае бурения, когда механическая скорость не постоянна во времени, толщина разрушаемого слоя породы h также переменна.

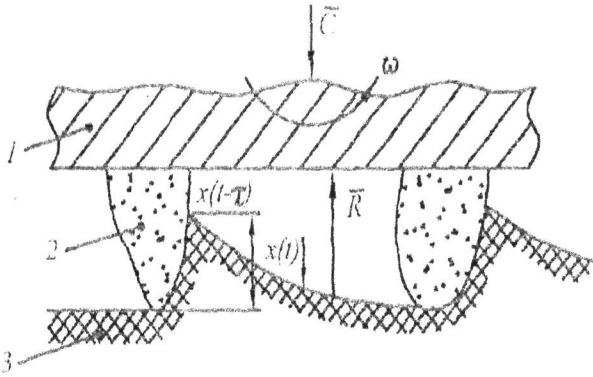


Рис. 1. Схема работы резцов на забое скважины при бурении: 1-корпус породоразрушающего инструмента (коронки); 2-резцы; 3-порода забоя; С - осевая нагрузка; R - реакция забоя.

Рассмотрим в качестве частного случая вариант бурения с большой (возможно, переменной) угловой скоростью, характерной для алмазного бурения, когда продолжительность отмеченного выше интервала времени τ мала. Разложив выражения (1) и (3) в ряды Тейлора по степеням τ , получим

$$\varphi - (\dot{\varphi} - \dot{v}\tau + \frac{1}{2}\ddot{\varphi}\tau^2 - \dots) = \alpha;$$

$$h = x - (x - \dot{x}\tau + \frac{1}{2}\ddot{x}\tau^2 - \dots),$$

и с точностью до величин второго и более высоких порядков малости будем иметь:

$$\tau = \frac{\alpha}{\dot{\varphi}}, \quad h = \frac{\alpha \dot{x}}{\dot{\varphi}}. \quad (5)$$

Таким образом, выражения (2) и (4), которые, применимы лишь для идеального стационарного режима движения резцов, могут быть приближенно справедливы и при анализе высокоскоростного бурения, когда угловая скорость $\omega = \dot{\varphi}$ и механическая скорость бурения $v = \dot{x}$ переменны во времени.

Непостоянство этих величин определяется изменением суммарной силы, с которой разрушаемая порода препятствует продольному перемещению бурового снаряда, т.е. изменением реакции R забоя, пропорциональной толщине разрушаемого слоя породы;

$$R = kh = k[x(t) - x(t-\tau)], \quad (6)$$

где k - эмпирический коэффициент, характеризующий прочность буримой породы, геометрию режущей части породоразрушающего инструмента и общее число работающих резцов.

Для стационарного режима бурения, в том числе и высокоскоростного, вместо зависимости (6) можно записать:

$$R = k\alpha \frac{v}{\omega}. \quad (7)$$

В общем случае бурения реакцию забоя определяют, исходя из эмпирических величин, характеризующих влияние механической скорости бурения и угловой частоты вращения бурового снаряда [1,2]:

$$R = n_0 \omega^{n_1} v^{n_2}, \quad (8)$$

где n_0, n_1, n_2 - эмпирические коэффициенты.

Существуют многие зависимости типа (8), но общим в них является близость формуле (7), в частности, всегда $n_0 > 0$ и $n_2 > 0$, а коэффициент n_1 , как правило, отрицателен ($n_1 < 0$), то есть реакция забоя растёт с увеличением механической скорости и уменьшается с ростом частоты вращения бурового снаряда.

Как правило, эти эмпирические коэффициенты определяются при проведении стендовых исследований в идеальных стационарных условиях, что трудно трансформировать на реальное бурение. Поэтому при анализе реальных процессов бурения с учётом колебаний как породоразрушающего инструмента, так и, главным образом, колебаний (продольных и крутильных) колонны бурильных труб целесообразно ориентироваться на зависимости (6) и (7).

Определение реакции забоя способствует составлению дифференциального уравнения углубки скважины:

$$m\ddot{x} = C - R, \quad (9)$$

где m - суммарная масса породоразрушающего инструмента, колонкового набора и соответствующей длины колонны бурильных труб (в сжатой её части), обеспечивающих необходимую осевую нагрузку на забой.

Уравнения типа (9) в математике и механике носят название дифференциально-разностных уравнений [1] и применяются для описания процессов, имеющих колебательный характер. Для высокоскоростного бурения, когда продольные колебания бурового снаряда имеют подчинённое значение, выражение (9) можно заменить, согласно зависимости (7), на дифференциальное уравнение первого порядка:

$$m\dot{v} = C - k\alpha \frac{v}{\omega} \quad (10)$$

При интегрировании уравнения (10) следует одновременно с ним рассматривать и уравнения вращения вала приводного двигателя и сопряжённого с ним через коробку передач шпинделя вращателя, передающего крутящий момент на колонну бурильных труб в соответствии с динамической характеристикой двигателя.

Эффективный момент сопротивления вращению бурового снаряда при разрушении горной породы пропорционален реакции забоя [2]:

$$M_o = fR,$$

где R - реакция забоя; f - коэффициент пропорциональности, или удельный момент сопротивления на единицу реактивной силы (реакции забоя).

Экспериментальные и теоретические данные [3] свидетельствуют, что в общем случае удельный момент сопротивления не постоянен во времени и зависит от угловой скорости вращения $\omega = \varphi$ колонны бурильных труб (бурового снаряда). Эта зависимость может быть иллюстрирована графиком (см.рис. 2), на котором могут быть выявлены два существенно различных частотных диапазона: низкочастотный ($0 < \omega < \omega_*$, где ω_* - критическая угловая скорость) и высокочастотный ($\omega > \omega_*$).

Внутри низкочастотного диапазона удельный момент сопротивления с ростом угловой скорости убывает $\left(\frac{df}{d\omega} < 0\right)$, а внутри высокочастотного - растёт $\left(\frac{df}{d\omega} > 0\right)$. В критическом случае ($\omega = \omega_*$) реализуется минимально возможное критическое значение удельного момента сопротивления: $f = f_*$ (см. рис. 2).

Отметим, что критическое значение удельного момента сопротивления f_* существенно ниже его пусковой величины f^* , т.е. $f_* < f^*$.

Исследования процесса разрушения породы при бурении показывают, что зависимость, изображённая на рис. 2, удачно аппроксимируется графиком кубической параболы

$$f = a + b\omega + c\omega^3, \quad (12)$$

где a, b, c - постоянные коэффициенты, зависящие от характера величин f^*, f_*, ω_* . Найдём эти зависимости при условии, что $f(0) = a = f^*$, т. е. коэффициент $a = f^*$ в нулевой момент (начало вращения).

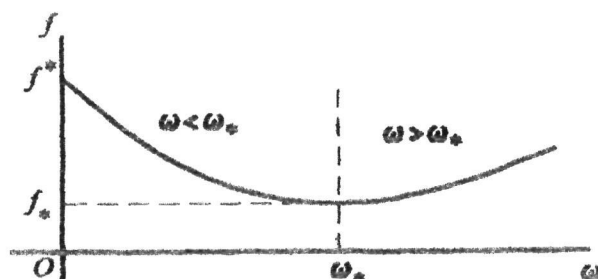


Рис. 2. Удельный момент сопротивления вращению бурового снаряда при разрушении породы как функция угловой скорости вращения

Из условия минимума функции имеем:

$$\left. \frac{df}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_*} = b + 3c\omega_*^2 = 0; \quad (13)$$

$$f|_{\omega=\omega_*} = f_* = f^* + b\omega_* + c\omega_*^3 + f_*$$

Решив систему (13), т.е. систему линейных алгебраических уравнений, получим

$$c = \frac{f^* - f_*}{2\omega_*^3}; \quad b = -\frac{f^* - f_*}{2\omega_*}$$

С учетом последних выражений зависимость (12) можно переписать в следующем виде:

$$f = f^* - \frac{f^* - f_*}{2} \cdot \frac{\omega}{\omega_*} \left(3 - \frac{\omega^2}{\omega_*^2} \right) \quad (14)$$

Отметим, что удельный момент сопротивления f по формуле (11) имеет размерность длины: $f = \frac{M_c}{R} = \frac{H \cdot m}{H} = m$. Поэтому его можно назвать эффективным радиусом сопротивления. Следует также отметить, что зависимость (11) имеет физическую природу, близкую к природе сухого трения [4], значит, возникающие при движении породоразрушающего инструмента по забою скважины динамические эффекты могут быть охарактеризованы как фрикционные. Тогда эффективный радиус сопротивления будет играть роль своеобразного коэффициента трения.

В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал, на основе которого предлагаются многие эмпирические зависимости для определения реакции забоя при бурении и момента сопротивления вращению бурового снаряда [3]. Предложенная в данной работе зависимость для удельного момента сопротивления (зависимость 14) является одной из наи-

более общих и реально достижимых, как и зависимость (7) для реакции забоя.

Существующие динамические модели работы породоразрушающих инструментов при бурении могут быть охарактеризованы как детерминированные [1], поскольку они не учитывают случайных воздействий буримой породы на породоразрушающий инструмент, так как учет этих воздействий требует, чтобы величины f^* , f_* , ω , рассматривались в качестве случайных функций продольного перемещения бурового снаряда (механической скорости бурения) и изменения его углового пути во времени (частоты вращения), но это значительно усложнит математическое описание процесса. Однако введение вероятностного моделирования для учета случайных функций имеет положительный эффект только для описания того процесса разрушения породы, для которого оно разработано, оставляя в стороне все другие процессы [5,6]

Конечно, полезно для описания детерминированного процесса выделять случайный компонент нагрузок на породоразрушающий инструмент, который реализуется в широкополосном частотном спектре, где он наиболее ярко выделяется. Примером такого явления может быть так называемая зубцовая частота, имеющая место при шарошечном бурении, т. е. частота ударов зубьев шарошки по породе забоя скважины:

$$\omega = z\omega \frac{h_{cp}}{r}, \quad (15)$$

где z , r - число зубьев и средний радиус шарошки; h_{cp} - среднее расстояние от оси шарошечного долота до центра отдельной шарошки; ω - ре-

ализуемая на забое частота вращения (угловая скорость) шарошечного долота.

Опыт бурения скважин различными инструментами (алмазными, твердосплавными, шарошечными и др.) показывает, что случайные составляющие сопротивления вращению бурового снаряда играют существенную роль при высокочастотных колебаниях бурового снаряда (что характерно, например, для алмазного высокоскоростного бурения). Но при бурении могут реализовываться и интенсивные низкочастотные колебания, отрицательно сказывающиеся на прочностных характеристиках снаряда и технологических показателях бурения, и здесь следует отметить, что при исследовании низкочастотных колебаний основную роль играют детерминированные составляющие сил сопротивления, являющиеся, например, основной причиной аномального износа алмазного породоразрушающего инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. - М.: Наука, 1976.-576с.
2. Рабинович Н.Р. Инженерные задачи механики сплошной среды в бурении. - М.: Недра, 1989.-270 с.
3. Справочник по бурению геологоразведочных скважин / Под ред. Е.А. Козловского.- Спб.: «Недра», 2000.-712 с.
4. Горшков Л.К. Основы теории механических колебаний в разведочном бурении. - Спб.: СПГГИ, 1988.-109с.
5. Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я. Статическая динамика горных машин.-М.: Машиностроения, 1976.-239 с.
6. Нагаев Р.Ф., Исаков К.А., Лебедев Н.А. Динамика горных машин. - Спб.: СПГГИ, 1996.-155 с.