Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVI, вып. 1, 1973 г.

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ ПРИ БУРЕНИИ ТВЕРДОЙ ПОРОДЫ

С. Н. Тараканов

В статье рассмотрено основное решение задачи о скорости проходки, опирающееся на теоретические положения, изложенные ранее *. Решение базируется на постоянстве площади контакта резца во времени бурения, на разделении глубины внедрения площади контакта на две части — верхнюю и нижнюю.

Нижняя часть резца формирует равную ей по высоте стружку скалывания, которая уменьшается с постоянной скоростью износа резца

$$i_m = \frac{l_к}{t_к}.$$

Верхняя часть стружки

$$\Delta h = \delta_0 - l_к \qquad (1)$$

исчезает под влиянием затупления резца со средней скоростью

$$j_m = \frac{\delta_0 - l_к}{t_к} = i_m\left(\frac{1}{a} - 1\right), \qquad (2)$$

$$a = \frac{l_к}{\delta_0}.$$

Эта скорость условно названа скоростью отжатия.

Сумма двух скоростей

$$i_m + j_m = \frac{i_m}{a} = u_m \qquad (3)$$

— суммарная скорость снижения глубины внедрения в породу изнашивающегося и затупляющегося резца.

Влияние на глубину разрушения породы части стружки в виде смятой породы под площадью износа учитывается при выборе граничного условия с учетом действительных мгновенных скоростей износа резца.

* Тараканов С. Н. Физические явления при бурении твердых пород и уточнение формулы скорости проходки, предложенной Е. Ф. Эпштейном. См. настоящий сборник.

Принятые здесь обозначения — те же, что в предыдущей статье.

На рис. 1 дано графическое изображение процесса разрушения породы. Из построения видно, что мгновенная скорость проходки может быть разложена на различные составляющие. Кривая *1* представляет собой действительную функцию $v=v(S_0, t)$; кривая *2*—вспомогательную функцию $v=v(v_0,t)$, совпадающую с действительной только на участке графика *ски* и отличающуюся от нее вблизи начала координат; вспомогательная прямая *3* показывает изменение скорости проходки в случае, если бы она определялась глубиной внедрения резца в породу при износе его с постоянной скоростью i_m. Вспомогательная прямая *4* определяет составляющую мгновенной скорости проходки v_l, которая обусловлена стружкой скалывания, численно равной высоте части резца, расположенной под плоскостью контакта и изменяющейся с постоянной скоростью износа резца $i=i_m$ при $S_д=S_к$. Составляющая мгновенной скорости проходки *5* образуется смятой породой под площадью износа резца.

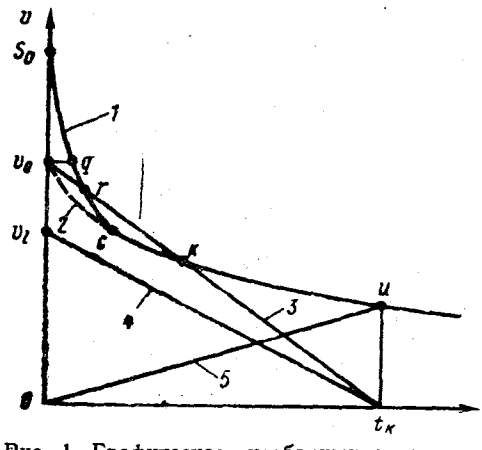


Рис. 1. Графическое изображение прохождения забойного процесса при бурении твердой породы затупляющимся резцом

Уравнение прямой *3* получаем так. При скорости износа резца $i=i_m$ истинная глубина внедрения резца в породу уменьшается так, что

$$\frac{dl}{dt}=-i_m. \tag{4}$$

Интегрируя это выражение, получаем

$$l=l_к-i_mt. \tag{5}$$

Разделив все члены его на a, имеем

$$h=h_0-\frac{i_mt}{a}.$$

Так как

$$\frac{dH}{dt}=mnh,$$

то

$$\frac{dH}{dt}=mn\left(h_0-\frac{i_m}{a}t\right). \tag{6}$$

Представим уравнение (6) в следующем виде:

$$\frac{dH}{dt}=v_0-mn\frac{i_m}{a}t. \tag{7}$$

Интегрируя его, получаем

$$H=v_0t-\frac{mnit^2}{2a}. \tag{8}$$

Одно значение проходки при $t=t_к$, т. е. на границе фаз объемного и усталостного разрушения породы, составит

$$H(t_к)=v_0t_к-\frac{mni_m t_к^2}{2a}. \quad (9)$$

Произведем следующие преобразования:

$$\frac{mnl_к t_к^2}{2at_к}=\frac{mnl_к t_к}{2a}=\frac{mnh_0 t_к}{2}. \quad (10)$$

Обозначим

$$\frac{mh_0}{H(t_к)}=I.$$

Определив

$$mh_0=H(t_к)I,$$

получим

$$H(t_к)=v_0t_к-\frac{nIH(t_к)t_к}{2}. \quad (11)$$

Решаем это уравнение относительно $H(t_к)$

$$H(t_к)=\frac{v_0t_к}{1+\frac{Int_к}{2}}. \quad (12)$$

Если это одно значение проходки будет численно равно действительной проходке

$$H(t_к)=\int_0^{t_к} vdt,$$

определяемой пока не известной нам функцией $v=v(v_0, t)$, то при замене в выражении (12) $t_к$ на t, по крайней мере на интервал времени $(O, t_к)$, определим любое другое значение проходки на указанном интервале

$$H=\frac{v_0t}{1+\frac{t}{t_к}}, \quad (13)$$

где $t_к=\frac{2}{In}$.

Мгновенная скорость проходки

$$\frac{dH}{dt}=\frac{v_0}{\left(1+\frac{t}{t_к}\right)^2}. \quad (14)$$

Из ранее изложенного известно, что

$$v_0=\frac{S_0}{\left(1+\frac{\Delta t}{t_{к0}}\right)^2}. \quad (15)$$

Заменяя

$$t_{к,0}=\frac{t_к}{\sigma}$$

и обозначая

$$\Delta t\sigma=\theta,$$

получим

$$v_0=\frac{S_0}{\left(1+\frac{\theta}{t_к}\right)^2}. \tag{16}$$

Поскольку

$$S_к=\frac{l_к}{a}mn=\frac{c_0mn}{ap\operatorname{tg}\alpha b}$$

и

$$t_к=\frac{1}{2\omega\mu_к p^2\pi Db\operatorname{tg}\alpha}\cdot\frac{c_0}{n},$$

то

$$v_0=\frac{c_0mn}{ap\operatorname{tg}\alpha b}\cdot\frac{1}{\left(1+\frac{\theta 2\omega\mu_к p^2\pi Db\operatorname{tg}\alpha n}{c_0}\right)^2}. \tag{17}$$

Проходка

$$H=\frac{c_0mn}{ap\operatorname{tg}\alpha b}\cdot\frac{1}{\left(1+\theta 2\omega\mu_к p^2\pi Db\operatorname{tg}\alpha\frac{n}{c_0}\right)^2}\cdot\frac{t}{1+\frac{2\omega\mu_к p^2\pi Db\operatorname{tg}\alpha nt}{c_0}}. \tag{18}$$

При $t=t_к$ получается средняя конечная скорость проходки

$$v_{м,к}=\frac{H}{t_к}=\frac{v_0}{1+1}=\frac{v_0}{2}. \tag{19}$$

Следовательно,

$$v_{м,к}=\frac{1}{2}\cdot\frac{c_0mn}{ap\operatorname{tg}\alpha b}\cdot\frac{1}{\left(1+\frac{\theta 2\omega\mu_к p^2\pi Db\operatorname{tg}\alpha n}{c_0}\right)^2}. \tag{20}$$

Дадим физическую интерпретацию этого решения.

При выводе формулы мы исходили только из линейного износа резца с постоянной скоростью износа $i=i_m$. Однако в области значений $t<\frac{t(k)}{2}$ мгновенные скорости износа резца больше средней скорости износа, поэтому в указанной области ординаты вспомогательной функции $v=v\ (v_0,\ t)$ меньше ординат прямой *3*. В области $t>\frac{t(k)}{2}$ мгновенные скорости износа меньше средней скорости i_m, принятой за постоянную при выводе уравнения (6). Кроме того, в указанной области снижение глубины разрушения замедлено существенным возрастанием составляющей скорости *5*. Следовательно, в этой области ординаты функций $v=v(v_0,\ t)$ и $v=v(S_0,\ t)$ будут больше ординат прямой *3* и поэтому кривая $v=v\ (v_0,\ t)$ и прямая *3* обязательно пересекаются в точке *k*, которой соответствует время $t=0{,}64\ t_к$.

Из рис. 1 видно, что скорость проходки в точке $t_к$ не может быть равной нулю. Она имеет конечное значение

$$v_к=z_к\,mn, \tag{21}$$

где $z_к$ — глубина смятой породы под площадью износа резца в момент $t_к$, соответствующий окончанию фазы объемного разрушения породы.

Из рис. 1 также видно, что луч $v_0 t_к$ можно повернуть около полюса v_0 так, чтобы площадь треугольника $Ov_0 t_к$ сделалась равновеликой площади криволинейной трапеции $OS_0 кит_к O$. Так как площадью трапеции определяется проходка в момент времени $t_к$, то условие равновеликости площадей будет выполнено при равенстве площадей $кит_к = ксv_0к$ и равенстве площадок $v_0 S_0 r = rск$. В формуле (17) величина θ постоянная. Поэтому формулу начальной скорости можно представить в следующем виде:

$$v_0 = \frac{c_0 mn}{apt g\alpha b(1 + n/n_к)^2}. \qquad (22)$$

Эта функция имеет максимум при $n = n_к$ и равна

$$v_{0,\,макс} = \frac{c_0 mn_к}{4apt g\alpha b}. \qquad (23)$$

Число оборотов $n_к$ называется критическим,

$$n_к = \frac{l_к}{2\omega\mu_к p\pi D\theta}. \qquad (24)$$

Выражение

$$\frac{l_к}{2\omega\mu_к p\pi D} = N, \qquad (25)$$

где N — полное число оборотов резца при износе его со средней скоростью i_m как постоянной.

Поэтому

$$\theta = \frac{N}{n_к}.$$

Так как N при заданной $l_к$ определяется только абразивным износом резца, а $n_к$ аналогично величине $t_к$ в выражении (14), определяемой также износом, то θ не зависит от параметров, вызывающих износ. Другими словами, θ равна произведению $\Delta t\sigma$, в котором величина Δt снижается, а σ возрастает под влиянием одного и того же фактора, вызывающего повышенный износ резца в первое время его работы. Поэтому θ не зависит от износа.

Проходка на коронку

$$H_к = \frac{v_0 t_к}{2}, \qquad (26)$$

поэтому

$$H_к = \frac{c_0^2 m}{2ap^3 t g^2\alpha b^2\pi D 2\omega\mu_к} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\theta 2\omega\mu_к p^2\pi D b t g\alpha n}{c_0}\right)^2}. \qquad (27)$$

Из этого выражения следует, что проходка резко снижается при увеличении p и менее резко при увеличении числа оборотов.

Если бурение будет производиться коронками различных диаметров с разными числами оборотов, то бурение при $\pi Dn = \text{const}$ при различных D и n и даст проходку $H_к \sim n$. Это справедливо только в том случае, если коронки имеют одно и то же число резцов.

Вообще формулы (20) и (27) позволяют выяснить зависимости $v_{м,к}$ и $H_к$ от различных сочетаний параметров забойного процесса и

могут применяться для изучения технологических процессов и работы самих коронок. Формула (13) легко приводится к следующему виду:

$$v_м = v_0 - k_0 H, \tag{28}$$

$$k_0 = \frac{1}{t_к}.$$

Графическое изображение этой функции, полученное по экспериментальным данным, показано на рис. 2. Из построения видно, что график функции (28) имеет два линейных участка: короткий *1* и длинный *2*, которые соответствуют фазе объемного разрушения породы. Криволинейный участок *3* соответствует переходу от фазы объемного к фазе усталостного разрушения породы. Продолжение участка графика *2* до пересечения с осями ординат дает на оси $v_м$ значение начальной скорости v_0, а на оси H величину проходки

$$H_п = \int_0^\infty v(t)\,dt,$$

т. е. $H_п$ представляет собой несобственный интеграл функции $v = v(v_0, t)$. Проходка $H_д$ —действительная проходка в фазе объемного разрушения породы. Действительное время работы резца

$$t_д = \frac{H_д}{v_{м.д}}.$$

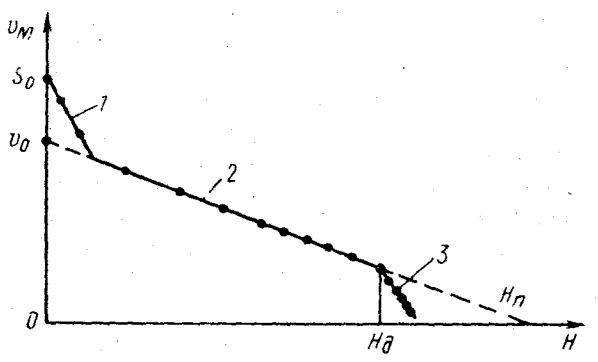


Рис. 2. Экспериментальная зависимость между средней скоростью проходки и суммарной проходкой

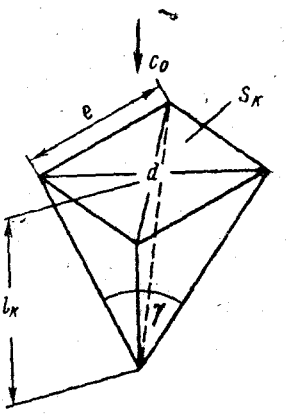


Рис. 3. Пирамидальный резец

Время $t_к$ определяется отношением

$$\frac{H_п}{v_0} = t_к.$$

Обычно $t_д$ несколько меньше $t_к$, если в процессе бурения не было сколотых резцов. Поясним это положение.

Функцию (7) можно записать так:

$$v = v_0\left(1 - \frac{t}{t_к}\right). \tag{29}$$

Заметим, что

$$t_к = \frac{l_к}{i_m}$$

не учитывает высокого износа резца в первое время его работы. Поэтому влияние высокого износа резца в указанный период прежде всего приведет к снижению v_0, которая поэтому всегда меньше S_0, не зависимой от износа. Нечувствительность величины $t_к$ к изменению начальных условий износа резца обеспечивает устойчивость решения задачи. Но, с другой стороны, это не дает возможности считать $t_к$ равной $t_д$.

Зависимость скорости проходки от различных параметров процесса бурения и их сочетаний, отмеченная при анализе формулы Е. Ф. Эпштейна, полностью выполняется для формулы (18).

Отметим, что эмпирическая формула в виде рациональной дроби

$$H = \frac{t}{a + bt}$$

получена И. М. Млодиком * в результате обработки экспериментальных данных. Она соответствует вспомогательной функции $v = v(v_0, t)$, значение которой совпадает со значениями действительной функции $v = v(S_0, t)$ на главном интервале времени бурения $(\Delta t, t_к)$. И. М. Млодик обрабатывал данные бурения цилиндрическими коронками с заостренными резцами различной формы — пластинчатыми и восьмигранными. В том и другом случаях он получил хорошие результаты: точность формулы оказалась не ниже 6%. Это позволяет произвести преобразование формулы (13) на случай бурения коронками с резцами других геометрических форм, т. е. формула (18) может быть преобразована для коронки с резцами более сложной формы. Лезвия таких резцов могут иметь форму естественных выступов, конуса, пирамиды, заостренного восьмигранника и т. п. В качестве представительного для указанной группы резцов примем резец с лезвием в виде четырехгранной пирамиды с квадратным основанием (рис. 3). У такого резца площадь пластического контакта с породой

$$S_к = \frac{c_0}{p},$$

полное время работы до затупления

$$t_к = \frac{l_к}{i_к},$$

истинная глубина внедрения

$$l_к = k_1 \sqrt{\frac{c_0}{p}},$$

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}\frac{\gamma}{2}},$$

где k_1 — геометрический коэффициент; γ — линейный угол при вершине пирамиды, расположенный в диагональной плоскости резца.

Следовательно, площадь контакта

$$S_к = \frac{l_к^2}{k_1^2} \cdot \qquad (30)$$

* Шамшев Ф. А., Млодик И. М. Материалы к технологии бурения твердыми сплавами. М., ГОНТИ, 1936.

Такой резец можно считать вписанным в пространство, занимаемое резцом менее определенной геометрической формы, например, резцом в форме естественного выступа.

У пирамидального резца высота части стружки Δh, расположенной над плоскостью контакта, определяется величиной площади контакта $S_к$, как и у заостренного пластинчатого резца, а истинная глубина внедрения резца $l_к$ примерно равна корню квадратному из значения истинной глубины внедрения заостренного пластинчатого резца

$$l'_к = \frac{1}{\frac{b}{k} \cdot \operatorname{tg}\alpha} \cdot \frac{c_0}{p}$$

при условии, если

$$k_1 = \sqrt{\frac{\Delta}{\frac{b}{k} \cdot \operatorname{tg}\alpha}}.$$

Учитывая, что у пирамидального резца ширина площади контакта

$$\sqrt{S_к} = \frac{l_к}{k_1}$$

повышается вместе с увеличением глубины внедрения $l_к$, число резцов, необходимое для однократного перекрытия ширины кольцевого забоя b, снижается при увеличении осевой нагрузки на забой C. За счет этого как бы высвобождается часть резцов для более производительной работы по углубке скважины. Кроме того, у пирамидального резца площадь износа растет быстрее износа резца по высоте.

При решении задачи на определение скорости проходки указанные выше свойства пирамидального резца, проявляющиеся в процессе бурения, дают возможность заменить пирамидальный резец заостренным пластинчатым резцом-моделью. У такого резца площадь контакта

$$S_к = \frac{c_0}{p},$$

время работы до затупления

$$t_к = \frac{l_к}{i_m},$$

а истинная глубина внедрения не $l_к$, как у пирамидального резца, а

$$l'_к = l_к^2 = \frac{k_1^2}{\Delta} \frac{c_0}{p}.$$

Замена позволяет найти исходное дифференциальное уравнение вида (6), решение которого дает одно значение проходки

$$H(\tau) = \frac{v_0 \tau}{2},$$

где τ — аналогично величине $t_к$, при котором

$$v_м = \frac{v_0}{2}.$$

Чтобы написать уравнение вида (6), найдем параметр забойного процесса u'_m для резца-модели, аналогичный u_m. Для пластинчатого заостренного резца средняя скорость износа

$$i_m = \frac{S_к}{\operatorname{tg}\alpha \frac{b}{k}} \cdot \frac{1}{t_к},$$

где $\frac{b}{k}$ — ширина плоскости контакта; k — число резцов, расположенных на ширине b.

Подставим в это выражение вместо площади контакта ее значение, определяемое выражением (30). При такой подстановке получаем

$$i'_m=\frac{l_к^2}{k_1^2 \operatorname{tg}\alpha \frac{b}{k}} \cdot \frac{1}{t_к}. \tag{31}$$

Из условия

$$k_1=\sqrt{\frac{\Delta}{\frac{b}{k} \cdot \operatorname{tg}\alpha}}$$

находим

$$k_1^2 \frac{b}{k} \cdot \operatorname{tg}\alpha=1=\Delta,$$

где Δ — коэффициент, имеющий размерность длины.

Поэтому

$$i'_m=\frac{l_к}{\frac{\Delta}{l_к} \cdot t_к}. \tag{32}$$

Произведение в знаменателе

$$\frac{\Delta}{l_к} \cdot t_к=\frac{\Delta}{l_к} \cdot \frac{l_к}{2\omega\mu_к p\pi Dn}=\frac{\Delta}{2\omega\mu_к p\pi Dn}=\tau. \tag{33}$$

Следовательно,

$$i'_m=\frac{l_к}{\tau}. \tag{34}$$

Величина i'_m относится к резцу-модели и аналогична i_m. Время τ, которое не зависит от $l_к$ или c_0, — это время работы резца-модели, при котором одно значение проходки

$$H(\tau)=\frac{v_0\tau}{2}.$$

Для определения параметра u'_m разделим обе части выражения (32) на a, тогда получаем

$$u'_m=\frac{i'_m}{a}=\frac{l_к}{\frac{a\Delta}{l_к} \cdot t_к}=\frac{i_m}{a_0}; \tag{35}$$

$$a_0=\frac{a\Delta}{l_к}.$$

Искомое дифференциальное уравнение

$$\frac{dH}{dt}=\frac{l_к mn}{a_0}-\frac{mni_m}{a_0} \cdot t, \tag{36}$$

или

$$\frac{dH}{dt}=v_0-mn\frac{i_m}{a_0} \cdot t \tag{37}$$

при

$$\frac{l_к mn}{a_0}=v_0.$$

Интегрируя уравнение (37), получаем

$$H=v_0 t - mn\frac{i_m t^2}{2a_0}. \tag{38}$$

Определяем одно значение проходки

$$H=H(\tau),$$

$$H(\tau)=v_0\tau - \frac{mni_m\tau^2}{2a_0}. \tag{39}$$

Так как

$$\frac{i_m}{a_0}\tau=\frac{l_к\tau}{t_к\frac{a\Delta}{l_к}}=\frac{l_к}{a},$$

то

$$H(\tau)=v_0\tau - \frac{mnl_к\tau}{2a}. \tag{40}$$

Подставляя

$$\frac{l_к m}{aH(\tau)}=I,$$

запишем

$$H(\tau)=v_0\tau - \frac{nIH(\tau)\tau}{2}.$$

Искомая проходка

$$H(\tau)=\frac{v_0\tau}{1+\frac{In\tau}{2}}. \tag{41}$$

Любое другое значение проходки, по крайней мере на интервале времени бурения (O, τ), будет

$$H=\frac{v_0 t}{1+\frac{Int}{2}}. \tag{42}$$

Так как

$$\frac{2}{In}=\tau,$$

то

$$H=\frac{v_0 t}{1+\frac{t}{\tau}}. \tag{43}$$

Мгновенная скорость проходки

$$v=\frac{dH}{d\tau}=\frac{v_0}{\left(1+\frac{t}{\tau}\right)^2}. \tag{44}$$

Начальная скорость проходки

$$v_0=\frac{S_0}{\left(1+\frac{\theta'}{\tau}\right)^2}. \tag{45}$$

Заданная начальная скорость проходки $S_0 = v_0$ при $v_0 = v_0(t=0)$, т. е. S_0 не зависит от износа. Поэтому

$$S_0 = \frac{l_к}{a_0} mn = \frac{1}{a} \cdot \frac{l_к^2}{k_1^2} \cdot \frac{kmn}{b \operatorname{tg}\alpha} = \frac{1}{a} \cdot \frac{c_0}{p} \cdot \frac{kmn}{b \operatorname{tg}\alpha}. \quad (46)$$

Так как

$$c_0 km = C,$$

то

$$S_0 = \frac{1}{a} \cdot \frac{C_n}{bp \operatorname{tg}\alpha}. \quad (47)$$

Покажем, что в этой формуле

$$\frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} = k_1.$$

Для этого представим

$$S_0 = \frac{l_к}{a} mn = \frac{k_1 \sqrt{S_к}}{a} mn \quad (48)$$

и определим m следующим образом. Полное число резцов в контакте с породой

$$M = \frac{C}{c_0} = \frac{C}{S_к p}. \quad (49)$$

Пусть

$$M = m \frac{b}{\sqrt{S_к}}.$$

Тогда

$$m = \frac{C}{S_к p} \cdot \frac{\sqrt{S_к}}{b}. \quad (50)$$

Поэтому

$$S_0 = \frac{k_1 \sqrt{S_к}}{a} \cdot \frac{C}{S_к p} \cdot \frac{\sqrt{S_к}}{b} n = \frac{k_1}{a} \cdot \frac{Cn}{pb}. \quad (51)$$

Из сравнения формул (47) и (51) следует, что $\frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} = \kappa_1$.

В выражении (45) неизвестным осталось время θ'. Ранее мы обозначали $\theta = \Delta t\sigma$. В этом забойном процессе $\theta' = \Delta t'\sigma'$.

Для резца пластинчатой формы справедливо отношение

$$\frac{\theta}{t_к} = \frac{n}{n_к}.$$

Следовательно,

$$\theta n_к = n t_к.$$

Для резца-модели

$$\theta' n'_к = n\tau = \frac{\Delta}{2\omega\mu_к p\pi D}. \quad (52)$$

В правой части выражения (52), в которую в явном виде не входит нагрузка на резец c_0, в завуалированной форме скрыты различные соче-

тания произведений величин θ' и $n'_к$. Таких сочетаний может быть несколько. Они должны отвечать различным условиям бурения.

Для определения в отдельности θ' и $n'_к$ исследуем время τ, для чего представим

$$\tau = \frac{c_0}{\frac{b}{k}\cdot \mathrm{tg}\alpha p} \cdot \frac{\Delta\frac{b}{k}\cdot \mathrm{tg}\alpha}{2\omega\mu_к c_0 \pi D n}; \qquad (53)$$

$$\frac{c_0}{\frac{b}{k}\cdot \mathrm{tg}\alpha p} = l'_к,$$

где $l'_к$ — истинная глубина внедрения резца-модели, которая пропорциональна нагрузке c_0.

Произведение

$$\Delta\frac{b}{k}\cdot \mathrm{tg}\alpha = \left(k_1\frac{b}{k}\cdot \mathrm{tg}\alpha\right)^2 = \Delta_0$$

постоянно и имеет размерность площади. Поэтому

$$2\omega\mu_к \frac{c_0}{\Delta_0}\cdot \pi D n = i''_m, \qquad (54)$$

где i''_m — средняя скорость износа модели-резца, которая как бы прямо пропорциональна нагрузке c^0.

Рассмотрим сочетание θ' и $n_к$, соответствующее износу резца, не зависимому от c_0, считая, что c_0, входящее в выражение (54), отражает не влияние износа, а влияние формы резца. С этой целью запишем

$$\theta' n'_к = \frac{a_1 c_0}{p}\cdot \frac{\Delta p n}{a_1 2\omega\mu_к c_0 \pi D n p} = \frac{a_1 S_к}{a_1 S_к}\cdot \frac{\Delta n}{2\omega\mu_к p \pi D n}. \qquad (55)$$

Теперь разделим выражение (55) на множители θ' и $n_к$ таким образом, чтобы выполнялось равенство $\frac{\theta'}{\tau} = \frac{n}{n'_к}$:

$$n'_к = \frac{n}{\beta_1 a_1 S_к}\sqrt{\frac{\Delta}{2\omega\mu_к p \pi D n}}$$

и

$$\theta'_к = \frac{a_1 S_к}{\beta_2}\sqrt{\frac{\Delta}{2\omega\mu_к \pi p D n}},$$

где β_1 и β_2 — размерные коэффициенты, имеющие размерность времени: $\beta_1[T^{\frac{1}{2}}]$; $\beta_2[T^{-\frac{1}{2}}]$; произведение $\beta_1\beta_2 = 1$; a_1 — размерный коэффициент, $a_1[T/L^2]$.

Этими преобразованиями учитывается, что начальная скорость проходки зависит не от начального износа резцов, который здесь не учитывается, а от заданной геометрической формы резца. При этом условии

$$\Delta t' = \frac{\sqrt{\tau}}{\beta_2} \text{ и } \sigma' = \frac{i''_m}{i_m} = \frac{1}{\Delta_0}\cdot \frac{c_0}{p};$$

$$\frac{1}{\Delta_0} = a_1.$$

Следовательно, искомое отношение

$$\frac{\theta'}{\tau} = \frac{n}{n_к} = \frac{a_1 c_0}{\beta_2}\sqrt{\frac{2\omega\mu_к \pi D n}{p\Delta}}. \qquad (56)$$

При $c_0 = \frac{C}{M}$ начальная скорость проходки

$$v_0 = \frac{k_i}{a} \cdot \frac{C_n}{b_p} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{a_1 C}{\beta_2 M}\sqrt{\frac{2\omega\mu_к \pi D n}{p\Delta}}\right)^2}; \qquad (57)$$

проходка

$$H(\tau) = \frac{v_0 \tau}{2};$$

конечная средняя скорость проходки

$$v_{м,\,к} = \frac{v_0}{2}.$$

Следовательно,

$$H(\tau) = \frac{k_1 \Delta}{2a} \cdot \frac{C}{\pi D b} \cdot \frac{1}{p^2} \cdot \frac{1}{2\omega\mu_к} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{a_1 C}{\beta_2 M}\sqrt{\frac{2\omega\mu_к \pi D n}{p\Delta}}\right)^2}. \qquad (58)$$

Средняя конечная скорость проходки

$$v_{м,к} = \frac{k_1}{2a} \cdot \frac{Cn}{bp} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{a_1 C}{\beta_2 M}\sqrt{\frac{2\omega\mu_к \pi D n}{p\Delta}}\right)^2}. \qquad (59)$$

При бурении с принудительной подачей, что характерно для алмазного бурения однослойными коронками, величина

$$\frac{1}{1 + \frac{t_1}{\tau}} = k_2,$$

входящая в выражение средней скорости

$$v_м = \frac{v_м}{1 + \frac{t_1}{\tau}}, \qquad (60)$$

постоянна. Действительно, t_1 — это такое время, по истечении которого производится корректировка усилия подачи коронки с целью восстановления механической скорости проходки до первоначального уровня, т. е. скорости, которая снизилась под влиянием затупления резцов. Это время при ручной регулировке подачи станка принимается пропорциональным τ. При автоматическом регулировании подачи коронки t_1 — время быстродействия регулятора подачи. Поэтому в общем случае выражение для средней скорости можно записать так:

$$v_м = \frac{k_1 k_2}{a} \cdot \frac{Cn}{bp} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{a_1 C}{\beta_2 M}\sqrt{\frac{2\omega\mu_к \pi D n}{p\Delta}}\right)^2}. \qquad (61)$$

Из формулы следует ряд важных выводов.

1. Скорость проходки имеет максимальное значение при критической нагрузке

$$C_к = \frac{\beta_2 M}{a_1\sqrt{\frac{2\omega\mu_к \pi D n}{p\Delta}}}.$$

При этой нагрузке значение скорости проходки

$$v_{м\,макс} = \frac{k_1 k_2}{4aba_1} \cdot \frac{\beta_2 M\sqrt{n}}{\sqrt{\frac{2\omega\mu_к p\pi D}{\Delta}}}. \qquad (62)$$

Критическая нагрузка уменьшается при увеличении числа оборотов (рис. 4). Изображенные на рис. 4 графики также определяют функцию

$$v_м = f\left(C, \frac{1}{p}\right).$$

Величина $1/p$ характеризует буримость горных пород. Поэтому при $1/p_1 > 1/p_2 > 1/p_3 > \ldots > 1/p$ максимум скорости проходки в породе определенной твердости достигается только при определенной нагрузке $C_к$. Это положение важно с точки зрения разработки оптимальной (по механической скорости проходки) технологии бурения.

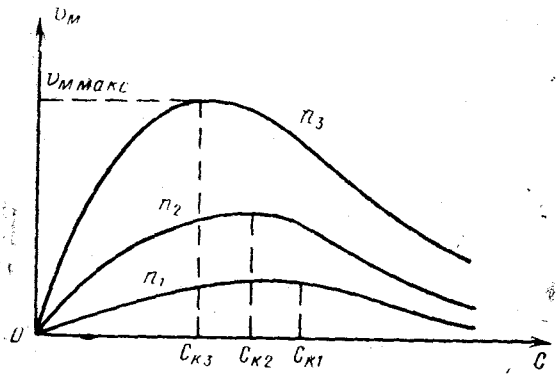


Рис. 4. Зависимость скорости проходки от осевой нагрузки на коронку при бурении с различными числами оборотов ($n_1 < n_2 < n_3 < \ldots n_i$)

В заключение отметим, что формула (61) может применяться к анализу процесса разрушения породы однослойными алмазными коронками, а также при исследовании других, более сложных забойных процессов. При исследовании забойных процессов формула легко спрямляется. Так, например, ее можно представить следующим выражением:

$$\sqrt{\frac{C}{v_м}} = \sqrt{\frac{abp}{k_1 k_2 n}} + \sqrt{\frac{abp}{k_1 k_2 n}} \cdot \frac{a_1 C}{\beta_2 M} \sqrt{\frac{2\omega\mu_к \pi D n}{p\Delta}}. \qquad (63)$$

Обозначив $\sqrt{\frac{C}{v_м}} = y_1$ и $\sqrt{\frac{abp}{k_1 k_2 n}} = y_0$ и определив y_0 из графического построения функции y_1, находим

$$\frac{y_1}{y_0} = 1 + \frac{C}{C_к}.$$

Отсюда определяется критическая нагрузка

$$C_к = \frac{C}{\frac{y_1}{y_0} - 1}, \qquad (64)$$

где нагрузка C соответствует определенному значению $y_1 = \sqrt{\frac{C}{v_м}}$.

Таким же образом устанавливаем функцию $y_2 = \sqrt{\frac{n}{v_м}}$ и др. Это дает возможность проверить формулу во всех деталях. Формула (58) нами проверена экспериментальными данными и может быть рекомендована к изучению различных сложных забойных процессов для решения ряда инженерных задач, связанных с оптимизацией технологии бурения, конструированием коронок и т. д.