Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVII, вып. 2, 1969 г.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ЗАТУПЛЯЮЩИМСЯ КЛИНОВЫМ РЕЗЦОМ, ПОЛНАЯ ФОРМУЛА СКОРОСТИ ПРОХОДКИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

С. Н. Тараканов

Задача о скорости проходки при вращательном бурении твердых горных пород приостренным резцом сводится к установлению общей зависимости проходки H от времени t при заданных параметрах режима бурения: осевой нагрузке c_0 и числе оборотов n и определению начальной скорости проходки v_0. Таким образом, требуется полностью определить функцию

$$H=\psi(t,\ v_0). \qquad (1)$$

Решение этой задачи произведено на основе теоретического анализа механизма разрушения твердой породы клиновым затупляющимся резцом, нагруженным постоянной осевой силой c_0, с привлечением для этой цели значительного экспериментального материала.

Изложение изучаемой проблемы начнем с простейшей схемы, изображающей взаимодействие резца с породой в начальный период его работы на забое, представленной на рис. 1 [7]. Клиновой резец с углом приострения α и длиной лезвия b под действием осевого усилия c_0 внедрился в породу и при вращении должен снимать стружку высотой h_0. Резец опирается на породу поверхностью, проекция которой на плоскость, перпендикулярную к направлению действия силы c_0 (так называемая площадь давления $S_д=xb$), лежит на некоторой глубине от поверхности забоя.

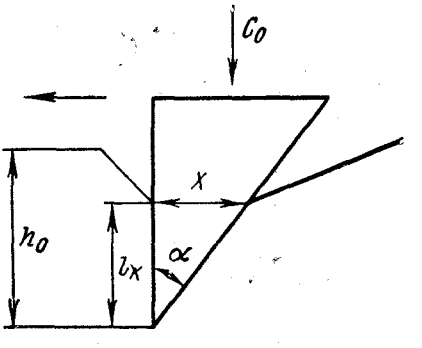


Рис. 1. Схема работы резца на забое в первый период

Площадь давления разделяет начальную глубину разрушения h_0 на две составляющих. Одна из них численно равна части высоты резца $l_к$, непосредственно контактирующей с породой; другая составляющая $l=h_0-l_к$ расположена выше площади давления.

Логично принять, что при износе и затуплении резца в плоскости контакта, т. е. на площади давления, среднее контактное давление не может превышать значения твердости породы p, $кГ/мм^2$, за все время $t=T$ работы резца в области объемного разрушения. При этом условии при действии на резец постоянной нагрузки c_0 площадь давления

$$S_д=\frac{c_0}{p} \tag{2}$$

будет сохраняться постоянной в течение времени T, т. е. величина площади давления не будет зависеть от величины затупления резца. Следовательно, часть резца, лежащая под площадью давления, будет производить разрушение породы так, как разрушал бы ее затупляющийся резец, сопротивление внедрения в породу которого не зависит от затупления.

При указанных условиях в момент T, соответствующий окончанию объемного разрушения породы вследствие полного затупления резца, конечная площадь затупления резца $S_к$ будет тождественно равна площади давления, что можно записать так: $S_д=S_к$ при $t=T$.

В соответствии с изложенным введем два параметра, характеризующих темп снижения глубины разрушения породы во времени под влиянием износа и затупления резца. Отношение

$$\frac{l_к}{T}=i_m \tag{3}$$

есть средняя скорость линейного износа резца, $мм/мин$; другое отношение —

$$i_m=\frac{h_0-l_к}{T}=\frac{l_к}{T}\left(\frac{1}{a}-1\right)=i_m\left(\frac{1}{a}-1\right),\ мм/мин \tag{4}$$

при $a=\frac{l_к}{h_0}$ —характеризует среднюю скорость, с которой постепенно исчезает часть глубины разрушения (h_0-l_k) под влиянием затупления, изменяющего условия разрушения породы.

При внедрении в породу резца, получившего затупление, порода дробится на более мелкие части. Это повышает удельную работу разрушения и снижает глубину внедрения резца, нагруженного постоянной осевой силой c_0.

Если бы скорость износа резца не зависела от времени, а уменьшение глубины разрушения породы на один оборот коронки под влиянием линейного износа и затупления резца определялось суммой скоростей исчезновения двух ее составляющих $l_к$ и $(h_0-l_к)$, то изменение мгновенной скорости проходки во времени $v=\frac{dH}{dt}$ определялось бы уравнением

$$\frac{dH}{dt}=n\left(h_0-\frac{i_m}{a}t\right), \tag{5}$$

где $\frac{i_m}{a}=i_m+i_m\left(\frac{1}{a}-1\right)$.

Однако в процессе разрушения породы действуют два возмущающих фактора, нарушающих линейную зависимость (5); 1) изменение скорости износа резца во времени; 2) образование непосредственно под площадью затупления резца раздавленной породы. Учет влияния этих дополнительных факторов на изменение действительной глубины

разрушения породы позволит подойти к окончательному определению вида функции $H=\psi(t,\ v_0)$ и ее производной $v=f(t,\ v_0)$.

На рис. 2 дана схема составляющих мгновенной скорости проходки, обусловленных различными составными элементами глубины разрушения. Прямая S_0T показывает изменение составляющей мгновенной скорости проходки, создаваемой частью резца высотой $l_к$. Аналитическое выражение этой составляющей

$$S=n(l_к-i_m t). \quad (6)$$

Линией $Ov_к$ показана вторая составляющая мгновенной скорости, обусловленная образованием глубины разрушения породы непосредственно под площадью затупления. Трапеция $OS_0v_кT$ есть полная проходка, совершенная частью резца, лежащей ниже площади давления. Линией v_0T представлена функция (5), показывающая, как бы изменялась мгновенная скорость $v=f(t,\ v_0)$, если бы отсутствовали указанные возмущения.

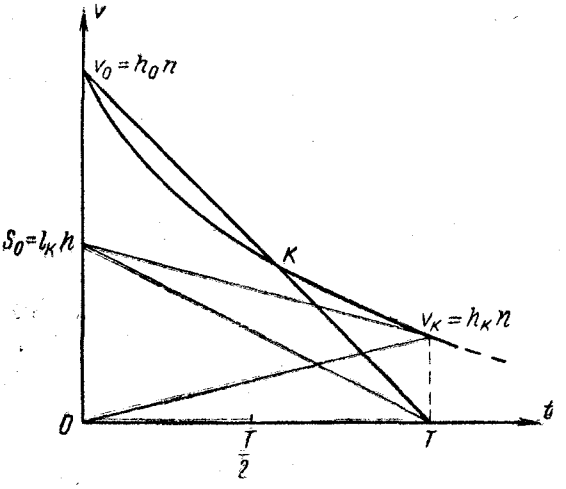


Рис. 2. Схема формирования составляющих мгновенной скорости проходки

Скорость линейного износа в начале работы резца больше. Это видно из опытной зависимости, представленной на рис. 3. Повышение скорости линейного износа резца в начальный период его работы должно снижать значения мгновенной скорости (5) в области $t<\frac{T}{2}$ (см. рис. 2). Нарастание глубины разрушения породы под площадью затупления, достигающей наибольшего значения вблизи точки $t=T$, увеличивает мгновенную скорость в области $t>\frac{T}{2}$.

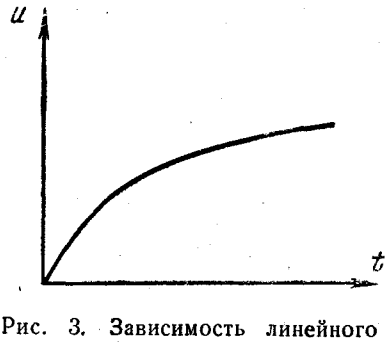


Рис. 3. Зависимость линейного износа (u) приостренного резца от времени

Площадь треугольника Ov_0T определяет проходку $H_к$ в момент T. Под влиянием вышеуказанных дополнительных факторов треугольник Ov_0T трансформируется в фигуру $Ov_0Kv_кT$. Если при такой трансформации площади фигур сохраняются постоянными, а точка пересечения кривой $v_0Kv_к$ с прямой v_0T лежит в области, принадлежащей точке $t=\frac{T}{2}$, то представляется возможным найти одно значение проходки $H_к$ для определенного v_0. Этого достаточно для решения первой части задачи.

Возможность замены одной площади другой основана на особом свойстве кривой $v=f(t,\ v_0)$, изображенной на рис. 2. Оно состоит в том, что начальная глубина внедрения резца $l_к$ и глубина раздав-

ленной породы под конечной площадью затупления $h_к$ всегда определяются значением нагрузки c_0. Поэтому их статистическое (в процессе бурения) отношение $\frac{h_к}{l_к}=\varepsilon$ должно оставаться независимым от нагрузки.

Учитывая изложенное о механизме образования стружки и существовании постоянной величины ε, можно предположить, что имеется единственная кривая, выражающая функциональную зависимость $v=f(t, v_0)$ для рассматриваемого процесса, которую и необходимо установить.

Если отсутствуют особо жесткие требования к граничному условию (положению точки T на оси времени), полагая, что прямая пересекается с кривой $v_0Kv_к$ в точке k, т. е. в момент, близкий к $t=\frac{T}{2}$, функцию $v=f(t, v_0)$ можно найти из треугольника Ov_0T, написав следующее выражение средней скорости для момента T

$$v_{ср}=v_0-\frac{v_0}{2}. \tag{7}$$

Приведем это выражение к следующему виду

$$\frac{H_к}{T}=v_0-\frac{JH_кn}{2}, \tag{8}$$

где $v_0=h_0n$ и $J=\frac{h_0}{H_к}$.

Решением формулы (8) относительно проходки $H_к$ является выражение

$$H_к=\frac{v_0T}{1+\frac{JnT}{2}}.$$

Вследствие единственности решения задачи о скорости проходки при заданной величине начальной скорости любое другое значение проходки $H=\psi(t, v_0)$, отличное от $H_к$, по крайней мере в интервале от $t=0$ до $t<T$, определяется выражением

$$H=\frac{v_0t}{1+\frac{Jnt}{2}}.$$

Так как

$$\frac{Jn}{2}=\frac{1}{T},$$

то

$$H=\frac{v_0t}{1+\frac{t}{T}}. \tag{9}$$

Обозначив $\frac{1}{T}=K_0$, запишем формулу (9) в более компактном виде

$$H=\frac{v_0t}{1+K_0t}. \tag{10}$$

Мгновенная скорость проходки

$$v=\frac{dH}{dt}=\frac{v_0}{(1+K_0t)^2}. \tag{11}$$

Положив $t=0$, получаем $v=v_0$. Следовательно, v_0 необходимо рассматривать как величину мгновенной скорости при $t=0$.

Заметим, что при $t=\frac{T}{2}$

$$v=\frac{v_0}{2{,}25}\approx\frac{v_0}{2},$$

чем и подтверждается правильность исходных положений, принятых при выводе формулы. Следовательно, T действительно есть время работы резца в области объемного разрушения породы.

Определим параметры K_0 и v_0. В момент $t=T$ объем изношенного клинового резца

$$V=\frac{S_к l_к}{2}.$$

Этот объем пропорционален работе сил трения $A_т$

$$V=\omega A_т,$$

где ω—коэффициент объемного износа резца, *мм³/кГ·мм*. Работа сил трения

$$A_т=\mu p\,\frac{S_к}{2}\,\pi DnT,$$

где μ—коэффициент трения; μp—удельная сила трения, *кГ/мм²*; $\frac{S_к}{2}$—средняя площадь затупления резца за время T, *см²*; D—средний диаметр коронки, *мм*. Следовательно,

$$\frac{S_к l_к}{2}=\omega\mu p\,\frac{S_к}{2}\,\pi DnT.$$

Отношение $\frac{l_к}{T}=i_m\,\omega\mu p\pi Dn$ есть средняя скорость линейного износа резца, *мм/мин*, поэтому

$$K_0=\frac{1}{T}=\frac{i_m}{l_к}=\frac{\omega\mu p\pi Dn}{l_k}.$$

Так как

$$l_к=\frac{c_o}{p\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b},$$

то

$$K_0=\omega\mu p^2\pi Db\,\mathrm{tg}\,\alpha\,\frac{n}{C_o}.$$

Обозначив

$$\frac{\omega\mu p^2\pi Db\,\mathrm{tg}\,\alpha}{c_o}=\beta,$$

запишем

$$K_0=\beta n.$$

Представим K_0 в следующем виде

$$K_0=\frac{i_m}{l_к}\cdot\frac{\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b}{\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b}=\frac{S_t}{S_д},$$

где S_t—средняя удельная площадь затупления резца, *мм²*; $S_д$—площадь давления, *мм²*.

Так как площадь давления не зависит от степени затупленности резца, то K_0 всегда прямо пропорционально числу оборотов. Это важное положение позволяет проверить теорию работы резца экспериментальными данными и решить задачу о начальной скорости.

Начальная скорость должна рассматриваться как функция времени. За очень короткий промежуток времени в начале бурения происходит формирование начальной геометрической формы резца в соответствии с заданными параметрами режима бурения c_0 и n. Начальная геометрическая форма лезвия резца характеризуется начальным рабочим углом приострения α_0, который показан на рис. 4. Этот угол всегда больше угла приострения α. За очень короткое время бурения Δt будет изношен элемент резца g и установится начальная глубина разрушения h_0, определяющая фактическое начальное условие рассматриваемого физического процесса, т. е. во время Δt имеет место переходный процесс, при котором глубина разрушения породы изменяется от наибольшего значения δ_0 до h_0. Глубина разрушения δ_0 относится к бурению с самым малым числом оборотов. Она может быть определена по формуле Эпштейна—Шрейнера

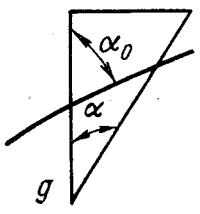


Рис. 4. Начальная геометрическая форма лезвия резца

$$\delta_0 = \frac{c_0}{a_0 p \operatorname{tg} \alpha \cdot b}, \tag{12}$$

где a_0—параметр, аналогичный $a = \frac{l_к}{h_0}$.

Проходка H при $t \to \infty$

$$H = \frac{v_0 t}{1 + K_0 t} = \frac{v_0}{K_0} = H_п$$

представляет предельную проходку $H_п$, значение которой легко получить из опытных данных графически. Действительно, формула (10) приводится для средней скорости к следующему виду

$$v_{ср} = v_0 - K_0 H. \tag{13}$$

Это выражение представляет собой прямую в отрезках, отсекающую на оси $v_{ср}$ (при $H=0$) значение v_0, а на оси H (при $v_{ср}=0$) предельное значение проходки $H_п = \frac{v_0}{K_0}$. Так как $v_0 = h_0 n$ и $K_0 = \beta n$, то $\frac{h_0}{H_п} = \beta$. Поскольку β не зависит от n, то всякое изменение h_0 под влиянием изменения числа оборотов вызовет соответствующее изменение $H_п$.

Наблюдения показали, что при бурении с постоянным значением нагрузки c_0 и при переменном числе оборотов n глубина разрушения h_0 снижается при увеличении числа оборотов. Соответственно этому уменьшается $H_п$. Поэтому для двух значений чисел оборотов n_1 и n_2 при $n_2 > n_1$ можно написать два уравнения

$$h_{0,1} = \beta H_{п,1};$$
$$h_{0,2} = \beta H_{п,2}.$$

Вычитая одно уравнение из другого, получаем

$$h_{0,1} - h_{0,2} = \beta (H_{п,1} - H_{п,2}),$$

или

$$h_{0,2} = h_{0,1} - \beta (H_{п,1} - H_{п,2}).$$

Последнее выражение справедливо для любой пары значений числа оборотов. Следовательно, изменению числа оборотов на величину $\Delta n=(n-n_0)$ будет соответствовать выражение

$$h_0=\delta_0-\beta L, \tag{14}$$

где δ_0—глубина разрушения породы, приходящаяся на один оборот резца при бурении с очень малым числом оборотов n_0.

Конечная разность $L=(H_{п,0}-H_п)$ определяет потерянную на резец проходку при изменении числа оборотов на Δn.

Выражение (14) составлено для интервала времени Δt, T, на котором изменение скорости проходки определяется средней скоростью износа резца i_m. Для малых изменений рабочей геометрии резца скорость износа $i>i_m$. Поэтому выражение (14) должно быть уточнено.

Представим его в следующем виде

$$h_0'=\delta_0-\mu_0\beta L, \tag{15}$$

где $\mu_0\leqslant 1$—отклонение скорости износа резца в начальный период его работы от средней скорости износа; меньшее значение μ_0 соответствует бурению с малым числом оборотов; $\mu_0=1$—бурение с высоким числом оборотов, при котором за очень короткое время резец полностью изнашивается.

Умножая выражение (15) на n, получаем

$$nh_0'=\delta_0 n-\mu_0\beta nL, \quad \text{где } \beta n=K_0. \tag{16}$$

Имея в виду формулу

$$v_{ср}=v_0-K_0H,$$

полученную на основе выражения

$$H=\frac{v_0t}{1+K_0t},$$

представим (16) в следующем виде

$$L=\frac{\delta_0 n\tau}{1+\mu_0\tau K_0},$$

где τ—время формирования начальной геометрической формы резца.

Скорость проходки в начальный период работы резца

$$v_0=\frac{dL}{d\tau}=\frac{\delta_0 n}{(1+\Theta K_0)^2}. \tag{17}$$

При увеличении числа оборотов μ_0 растет, а τ снижается. Поэтому произведение $\mu_0\tau=\Theta$ будет величиной, независимой от n.

Назовем Θ приведенным временем формирования начальных условий работы резца, независимым от n.

Вводя величину δ_0, мы допустили существование наибольшей проходки $H_{п,0}$, определяемой выражением

$$H_{п,0}=\frac{\delta_0}{\beta}.$$

Отметим, что функция (17) имеет максимум при числе $n_к = \frac{1}{\beta\Theta}$, известном как критическое. В этом случае

$$v_{0\,max} = \frac{\delta_0 n_к}{4}.$$

Критическому числу оборотов соответствует полная проходка

$$H_п = \frac{\delta_0}{4\beta} = \frac{H_{п,0}}{4},$$

откуда следует, что при бурении с критическим числом оборотов проходка снижается в 4 раза по сравнению с проходкой $H_{п,0}$, которую можно было бы получить при самом малом числе оборотов.

Таким образом, проходка

$$H = \frac{\delta_0 n}{\left(1+\frac{\Theta}{T}\right)^2} \cdot \frac{t}{1+\frac{t}{T}}. \qquad (18)$$

Заменяя $\delta_0 = \frac{l_0}{a_0}$ аналогичным выражением $h_0 = \frac{l_к}{a}$, где a_0 не зависит от твердости пород, определяя

$$l_0 = \frac{c_0}{a_0 p \operatorname{tg}\alpha \cdot b}$$

и распространяя формулу (17) на случай бурения коронкой с m резцами, получаем окончательное выражение для проходки

$$H = \frac{c_0 m n}{a_0 p \operatorname{tg}\alpha \cdot b} \cdot \frac{1}{\left(1+\frac{\Theta}{T}\right)^2} \cdot \frac{t}{1+\frac{t}{T}}. \qquad (19)$$

Для анализа формулы (19) необходимо рассмотреть свойства параметра Θ.

1. Приведенное к средней скорости износа резца i_m время формирования начальной рабочей геометрической формы резца Θ было выше определено независимым от числа оборотов. Теперь покажем, что Θ не зависит от $l_к$ (или c_0), а также от μ, ω, p и D.

Критическое число оборотов

$$n_к = \frac{1}{\beta\Theta} = \frac{l_к}{\omega\mu p \pi D \Theta}. \qquad (20)$$

При рабочем числе оборотов коронки $n = n_к$ начальная глубина разрушения породы $h_0 = \delta_0/4$. Если представим графики функции $h_0 = \frac{\delta_0}{\left(1+\frac{n}{n_к}\right)^2}$ в прямоугольной системе координат для k различных значений δ_0 так, чтобы $\delta_{0,1} > \delta_{0,2} \ldots \delta_{0,\,к-1} > \delta_{0,к}$, то получим семейство кривых. Можно установить, что отношение $\frac{h_0}{\delta_0} = \frac{1}{4}$ будет тем ближе расположено к началу координат, чем меньше δ_0, а следовательно, и $l_к$. Из этого следует, что $n_к$ будет уменьшаться при уменьшении δ_0.

Напротив, при постоянном δ_0 отношение $\frac{h_0}{\delta_0} = \frac{1}{4}$ будет тем ближе расположено к началу координат, чем больше любой из параметров μ, ω, p и D, вызывающих увеличение износа резца за один оборот.

Поэтому на основании выражения (20) и изложенного выше можно сделать следующий вывод: параметр Θ не зависит от $l_к$, а при $l_к$ = =const—от μ, ω, p и D.

2. Если технологический процесс бурения организован таким образом, что при некоторых сочетаниях параметров процесса разрушения величина T сохраняется постоянной, то и время Θ будет постоянным, составляющим некоторую часть от T.

Из выражения

$$T = \frac{1}{\omega\mu\pi D} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{l_к}{n} \tag{21}$$

следует, что T постоянно при бурении: в одной и той же породе при сохранении постоянным отношения $\frac{l_к}{n}$; в породах разных твердостей при $l_к$=const и независимом от твердости pn. В первом случае при увеличении числа оборотов требуется одновременное увеличение глубины внедрения резца $l_к$, во втором—нагрузка на резец $c_0 = S_д p$ должна повышаться с увеличением твердости породы, что обеспечит независимость $l_к$ от твердости. В этом случае площадь давления $S_д$ не зависит от твердости породы. Постоянство произведения pn обеспечивается при бурении более твердых пород с более низким числом оборотов.

Отметим также, что эмпирическая зависимость

$$H = \frac{t}{q + rt} \tag{22}$$

для твердосплавного бурения была обнаружена И. М. Млодиком при обработке данных экспериментального бурения, проведенного Ф. А. Шамшевым [6]. Исследователи установили линейный характер от времени бурения следующего выражения:

$$\frac{t}{H} = q + rt$$

и определили коэффициенты q и r для многих опытов. Оценивая степень спрямления этого выражения, исследователи указали, что формула обладает точностью $\pm 1{,}6\%$.

Автор настоящей статьи детально исследовал выражение (19) и установил следующее:

1. Формула (19) является математически точной.

2. Зависимость $H = \psi(t, v_0)$ оказывается справедливой и в области $t > T$. При этом обнаружено, что график функции

$$v_{ср} = v_0 - K_0 H \tag{23}$$

при бурении очень твердых пород вблизи оси H имеет резкий излом в сторону этой оси. Этим отмечается переход резца от объемного разрушения породы к усталостному.

Установлено, что при бурении многорезцовым породоразрушающим инструментом области усталостного разрушения почти не существует; точнее, она сильно сокращается за счет „растяжения“ области объемного разрушения, что объясняется различной степенью износа резцов во времени, флюктуациями твердости породы в различных точках забоя, и также снижением интенсивности износа резцов при усталостном характере разрушения породы.

Точка перегиба графика функции (23) для различных условий бурения соответствует времени бурения t_n, которое лежит в интервале $(2\div3)T > t_п > T$. Времени бурения $t=2T$ соответствуют проходка $H=\frac{2}{3}v_0T$ и мгновенная скорость проходки $v=\frac{v_0}{9}$.

Наибольший практический интерес, особенно при бурении лопастными долотами, представляет время бурения $t=T$, которому соответствует проходка $H_к=\frac{v_0T}{2}$. При этом времени бурения $v=\frac{v_0}{4}$ и $v_{ср}=\frac{v_0}{2}$.

3. При качественной проверке зависимости Эпштейна—Шрейнера (12) отклонений не обнаружено.

4. Коэффициент износа ω не зависит от параметров режима бурения, поскольку K_0 точно следует его аналитическому выражению.

5. Отмечено, что очистка забоя от шлама проходит более эффективно при высоких оборотах коронки.

6. Формула (19) справедлива для приостренных резцов различной формы.

Приведенное решение задачи о скорости проходки позволяет поставить и решить многочисленные частные задачи технологии бурения, выдвигаемые практикой, а также дает метод исследования более сложных процессов бурения, какими являются алмазное и дробовое бурение, поскольку закономерности работы затупляющегося резца при вращательном бурении являются общими.

Проиллюстрируем изложенное некоторыми примерами из области технологии бурения.

Пример 1. Цикл бурения данной породы производится при постоянном произведении Cn.

При времени бурения $t_р=T$ средняя скорость

$$v_{ср}=\frac{c_0mn}{2a_0p\operatorname{tg}\alpha\cdot b}\cdot\frac{1}{\left(1+\frac{\Theta\omega\mu p^2\pi Db\operatorname{tg}\alpha\cdot n}{c_0}\right)^2}.$$

Второй сомножитель повышается с увеличением C_0 и снижением n. Поэтому средняя скорость при постоянном $c_0mn=Cn$ увеличивается при снижении n и увеличении c_0.

Проходка на коронку (долото)

$$H_к=\frac{c_0^2m}{2a_0p^3b^2\operatorname{tg}^2\alpha\cdot\omega\mu\pi D}\cdot\frac{1}{\left(1+\frac{\Theta\omega\mu p^2\pi Db\cdot\operatorname{tg}\alpha\cdot n}{c_0}\right)^2}.$$

Таблица 1

Cn, 10^2, *кг/мин*	v_0, *мм/мин*	K_0, *1 мин*	$H_п=\frac{v_0}{2K_0}$
~660	73,4	0,310	118
~670	95,0	0,164	290
~570	109,0	0,097	560

Оба сомножителя этого выражения растут с увеличением c_0. Кроме того, второй сомножитель увеличивается при уменьшении n. Поэтому проходка принимает очень высокое значение. Этот пример иллюстрируется данными табл. 1, составленной по экспериментальным данным, полученным Ф. А. Шамшевым при бурении по гнейсу.

Рассмотренная технология бурения должна применяться в абразивных породах и при глубоком бурении, т. е. в тех случаях, когда необходимо получить большое значение проходки на долото при умеренной величине механической скорости.

Пример 2. Нагрузка на забой ограничена, а число оборотов выбирается произвольно или с учетом глубины бурения. В этом случае

$$v_{ср}=\frac{c_0 mn}{2a_0 p\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b}\cdot\frac{1}{(1+\Theta\beta n)^2},$$

откуда следует, что средняя скорость проходки прямо пропорциональна нагрузке на забой $C=c_0 m$ и повышается с увеличением числа оборотов. Однако она растет медленнее числа оборотов.

Проходка

$$H_к=\frac{c_0^2 m}{a_0 p^3\,\mathrm{tg}^2\,\alpha\cdot b^2\omega\mu\pi D}\cdot\frac{1}{(1+\Theta\beta n)^2}$$

при $\beta=\dfrac{\omega\mu p^2\pi D b\,\mathrm{tg}\,\alpha}{c_0}$.

Из этого выражения следует, что проходка на коронку (долото) снижается при увеличении числа оборотов и в очень сильной степени повышается с увеличением c_0. Это обычный режим бурения, когда нагрузка на забой ограничена прочностью резцов, а число оборотов выбирается в соответствии с глубиной бурения. При этой технологии проходка на коронку меньше проходки, рассмотренной в примере 1. Однако механическая скорость проходки в ряде случаев может быть выше скорости, определенной в примере 1.

Пример 3. Бурение различных по твердости пород производится при постоянных $l_к$ и $np=\delta$. При этих условиях T и Θ и их отношение $\frac{\Theta}{T}$ —постоянные величины. Поэтому средняя скорость проходки

$$v_{ср}=\frac{S_д m p n\delta_1}{2a_0 p\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b}=\frac{A_1}{p}, \qquad (24)$$

где $A_1=\dfrac{S_д m\delta\delta_1}{2a_0\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b}$, *кг/мин·мм* и $\delta_1=\dfrac{1}{\left(1+\dfrac{\Theta}{T}\right)^2}$ —постоянные.

Проходка на коронку (долото)

$$H_к=\frac{v_0 T}{2}=\frac{A_1 T}{p},\ мм.$$

Расход коронок (долот) на единицу проходки

$$R=\frac{1}{H_к}=\frac{p}{A_1 T},$$

где A_1 и T—постоянные.

В этом примере выражена наиболее широко распространенная технология бурения. Поэтому формула (24) отражает среднюю (статистическую) величину механической скорости проходки, которая приводится в справочниках на проектирование буровых работ и единых норм выработки (ЕНВ) как буримость горных пород при полной отработке долот режущего типа.

В табл. 2, иллюстрирующей этот пример, приведена шкала буримости для бескернового бурения в виде данных о проходке за рейс и механической скорости проходки. Там же дано время рейса $t_р=T$, которое теоретически должно быть независимым от твердости пород, а следовательно, и категории по буримости. Незначительное повышение $t_р$ в сторону более твердых пород объясняется передержкой долот на забое в связи со стремлением буровых мастеров увеличить проходку на долото при бурении этих пород.

Таблица 2

Показатели	Категория пород по буримости			
	IV	V	VI	VII
Средняя скорость проходки (ЕНВ 1963 г.), *м/ч*	4,38	2,80	1,79	1,32
Проходка за рейс, *м*	18,00	12,00	8,00	6,00
Время рейса, *ч*	4,12	4,3	4,46	4,53

Пример 4. Цикл бурения производится при $n/l_к=\text{const}$. В этом случае Θ и Θ/T—постоянные. Поэтому $\dfrac{1}{\left(1+\dfrac{\Theta}{T}\right)^2}=\delta_2$—постоянная величина.

При $t_р=T$ средняя скорость проходки

$$v_{ср}=\frac{c_0 mn\delta_2}{2a_0 p\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b},$$

проходка на коронку (долото)

$$H_к=\frac{c_0 mn\delta_2}{2a_0 p\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b}\,T.$$

Из двух последних выражений следует, что средняя скорость проходки и проходка на долото прямо пропорциональны произведению $Cn=c_0 mn$.

Расход коронок (долот)

$$R=\frac{1}{H_к}=\frac{2a_0 p\,\mathrm{tg}\,\alpha\cdot b}{Cn\delta_2 T}$$

обратно пропорционален Cn. Его абсолютное значение зависит от T, являющегося функцией отношения $n/l_к$: чем меньше это отношение, тем меньше расход коронок.

Технология бурения, рассмотренная в этом примере, при твердосплавном бурении применяется сравнительно редко и имеет больший практический и теоретический интерес для бурения алмазными коронками.

Пример 5. Бурение производится при принудительной подаче коронки. В этом случае

$$v_{ср}=\frac{v_0}{1+\dfrac{\Delta l i_m}{l_к}}, \qquad (25)$$

где Δt—интервал времени бурения, через который нагрузка на забой по мере снижения скорости проходки, вызванной износом и затуплением резцов, периодически повышается на величину ΔC, чем поддерживается постоянство скорости проходки. Произведение $\Delta t i_m = l_и$ есть линейный износ резца по высоте за время Δt.

При ручном регулировании подачи коронки $l_и$ прямо пропорционально $l_к$, так что отношение $l_и/l_к = k_1$ есть некоторая постоянная величина. Поэтому, обозначая $\frac{1}{1+k_1} = k$, имеем $v_{ср} = k v_0$.

Раскрывая это выражение, получаем

$$v_{ср} = k \frac{C_н n}{a_0 p \operatorname{tg} \alpha \cdot b} \cdot \frac{1}{\left(1 + \Delta_1 \frac{n}{l_к}\right)^2},$$

где $\Delta_1 = \Theta \omega \mu p \pi D$; $C_н$—начальная рабочая нагрузка на забой, которой определяется значение средней скорости проходки.

Режим принудительной подачи наиболее часто применяется при бурении алмазными однослойными коронками. Ввиду актуальности этого вопроса остановимся на нем более подробно.

В предыдущем примере было показано, что при одновременном увеличении n и C средняя скорость проходки пропорциональна произведению Cn. Это положение сохраняет силу и для бурения с принудительной подачей. Поэтому при бурении однослойной мелкоалмазной коронкой для получения прямой зависимости средней скорости проходки от числа оборотов (с целью использования более высоких чисел бурового станка, позволяющих увеличить скорость бурения) нет необходимости поддерживать отношение $n/l_к$ постоянным. Чтобы устранить влияние износа и затупления резцов на снижение скорости проходки при увеличении n, достаточно при его повышении лишь несколько увеличивать $C_н$. В дальнейшем значение скорости проходки поддерживается на одном уровне путем цикличного повышения нагрузки на забой до значения $C_к$, при котором затупленная коронка снимается с работы.

Для того чтобы средняя скорость проходки не изменялась, очень важно правильно выбрать отношение нагрузок $C_н/C_к = \varphi$, от которого сильно зависит расход алмазов, особенно при бурении грубых по структуре горных пород. В этом случае высокое значение φ способствует большому обнажению алмазов из матрицы и увеличению их потерь при их скалывании при перегрузках. Напротив, бурение пород невысокой твердости даже выгодно вести при $\varphi = 1$, т. е. при свободной подаче инструмента. В этом случае растет скорость проходки и снижается расход алмазов.

Здесь важно остановиться на бурении очень твердых пород. При бурении этих пород поддержание отношения $n/l_к$ постоянным практически невозможно. Выпуск резцов у алмазной коронки очень мал и они обладают ярко выраженной разновысотностью. При этих условиях увеличение нагрузки на забой ведет к увеличению сближения торца коронки с породой, от которого зависит число резцов, входящих в контакт с породой. Следовательно, число одновременно работающих резцов мелкоалмазной коронки зависит от нагрузки на забой.

Так как резцы имеют различный выпуск на торце коронки, то они входят в породу на различную глубину. Резцы, углубившиеся в породу больше, подвергаются перегрузкам при снятии глубокой пород-

ной стружки и быстро разрушаются. Поэтому всякий раз, когда нагрузка на забой увеличивается на ΔC, происходят обнажение новой группы резцов и нивелировка их вершин под действием разрушающих алмазы нагрузок. Следовательно, можно считать, что увеличение нагрузки на забой ведет только к увеличению числа одновременно работающих на забое резцов, а величина $l_к$, исчисленная в этом случае как средняя для всей совокупности внедрившихся в породу резцов, не зависит от нагрузки $C_н$. Это хорошо подтверждается прямолинейной зависимостью, ограниченной временем Δt средней скорости проходки от увеличения нагрузки $C_н$.

Из выражения (25) следует, что при $l_к$, независимом от $C_н$, $v_{ср} \equiv v_0$. Действительно,

$$v_0 = \frac{C_н n}{a_0 2 \operatorname{tg} \alpha \cdot b} \cdot \frac{1}{\left(1+\frac{\Theta}{T}\right)^2}.$$

При $l_к$=const будет постоянной и величина T, поскольку i_m не зависит от нагрузки, а $T = l_к / i_m$. Поэтому $v_{ср} \equiv C_н$, что и наблюдается в практике для значительного интервала изменения этой нагрузки.

Таким образом, поддержание прямой зависимости скорости проходки от числа оборотов при бурении более твердых пород при повышении нагрузки на забой производится не за счет увеличения $l_к$, а за счет возрастания числа одновременно работающих резцов. Следовательно, при бурении очень твердых пород прямая зависимость $v_{ср}(n)$ при повышении числа оборотов с n_1 до n_2 возможна при более значительном увеличении нагрузки $C_н$ и бурении с малыми φ, обеспечивающими низкий расход алмазов.

Заметим, что теоретически расход алмазов тем меньше, чем меньше отношение $n/l_к$. Однако высокие $l_к$ соответствуют высоким значениям φ, что в очень твердых породах может устранить положительный эффект от низкого значения отношения $n/l_к$. Высокое φ в таких породах может вызвать катастрофический износ коронки.

Выясним некоторые детали, связанные с расходом алмазов на бурение. Средний весовой расход алмазов на единицу проходки

$$J_в = \frac{G}{H_к},$$

где G—фактический расход алмазов; $H_к$—проходка на коронку. Умножив числитель и знаменатель этого выражения на время работы коронки $t_к$, имеем

$$J_в = \frac{G}{t_к} : \frac{H_к}{t_к}.$$

Отношение $G/t_к = i_в$ есть средний расход алмазов в единицу времени. Замечая, что $H_к/t_к = v_{ср}$, получаем

$$J_в = \frac{i_в}{v_{ср}}.$$

Так как $v_{ср}$ нам известна, то для определения $J_в$ надо найти $i_в$.

Если примем число одновременно работающих резцов на забое при нагрузках $C_н$ и $C_к$ одинаковым, то легко получается следующее выражение

$$i_в = \frac{\mu \omega C_н \pi D n}{c_1 \varphi},$$

где $c_1 > 1$ учитывает изменение площади затупления резца с течением времени. Поэтому

$$J_в = \frac{a_0 \omega \mu \pi D b \operatorname{tg} \alpha \cdot p \left(1 + \Delta_1 \frac{n}{l_к}\right)^2}{c_1 \varphi}. \qquad (26)$$

Из этой формулы следует, что при $\varphi = \text{const}$ расход алмазов повышается при увеличении твердости породы, причем твердость пород входит и в величину $\Delta_1 = \Theta \omega \mu p \pi D n$.

При бурении более твердых пород коронками, армированными более мелкими алмазами, φ может приниматься бо́льшим, так как механическая прочность мелких алмазов выше.

Приняв $\varphi = c_2 p$, имеем

$$J_в = \frac{a_0 \omega \mu \pi D b \cdot \operatorname{tg} \alpha \left(1 + \Delta_1 \frac{n}{l_к}\right)^2}{c_1 c_2}.$$

Даже в этом случае расход алмазов будет повышаться при увеличении твердости пород p, которая входит в выражение Δ_1. Отметим, что только при постоянном значении отношения $\frac{pn}{l_к}$ расход алмазов может не зависеть от твердости.

Необходимо указать, что зависимость расхода алмазов от числа оборотов сложна. При некотором числе оборотов n' расход алмазов имеет минимальное значение, как показано на рис. 5. Кривые *1* и *2* выражают износ алмазов соответственно для более и менее твердых пород. Минимальный расход алмазов в более твердой породе получается при меньшем n'.

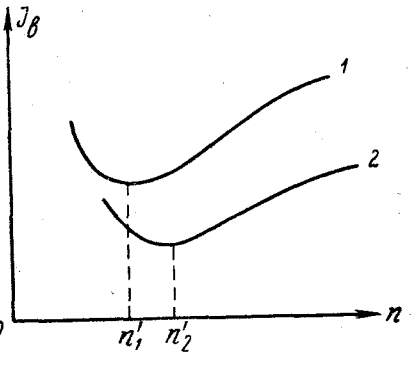


Рис. 5. Зависимость расхода алмазов от числа оборотов

Характер этих кривых можно пояснить анализом формулы (26). Бурение при низких числах оборотов идет неэффективно. В этом случае износ матрицы и обнажение алмазов происходят при непосредственном контакте матрицы с породой, так как небольшое количество разрушенной породы, образующееся на забое в единицу времени при низком n, не обеспечивает достаточного абразивного действия на матрицу коронки. Такой характер работы коронки на забое неизбежно вызывает передачу части осевой нагрузки $C_н$ на забой непосредственно через упругие контакты матрицы с породой, минуя алмазы. В результате этого среднее удельное давление на породу снижается, износ матрицы идет неэффективно и небольшое число обнаженных алмазов, через которые передается вторая часть осевой нагрузки, работает с небольшим выпуском. Это приводит к низкой скорости проходки и высокому расходу алмазов на единицу проходки.

Увеличение числа оборотов в области $n < n'$ ведет к интенсификации процесса разрушения породы, повышенному износу матрицы, лучшему обнажению алмазов и более эффективному использованию осевой нагрузки $C_н$. Последняя вблизи точки n' почти полностью передается на породу непосредственно через алмазы.

При увеличении числа оборотов бурение ведется при $n/l_к = \text{const}$ с возрастанием $\varphi = C_н(n)/C_к$, где $C_н(n)$ — эффективно передаваемая на забой часть нагрузки, зависимая от числа оборотов в интервале изменения от $n=0$ до $n=n'$.

Из примера 4 уже известно, что в аналогичном случае расход коронок на бурение снижается пропорционально произведению Cn, а в данном случае — $C_н(n)\,n$. Этим объясняется снижение расхода алмазов при повышении числа оборотов от $n=0$ до $n=n'$, представленное на рис. 5.

При бурении с числами оборотов $n \geqslant n'$ имеет место нормальный режим работы коронки, при котором отношение $n/l_к$ повышается при увеличении числа оборотов, а величина φ стабилизируется и становится постоянной, равной $C_н/C_к$. Однако бурение при числе оборотов n' дает низкую скорость проходки. Поэтому наивыгоднейшее число оборотов в подавляющем большинстве практических случаев лежит в области $n > n'$.

Ограниченный объем статьи не позволяет подробно рассмотреть работу алмазных коронок других конструкций. Поэтому мы ограничимся только некоторыми существенными замечаниями.

Работа многослойной алмазной коронки не имеет принципиального отличия от работы однослойной коронки. В зависимости от характера отношения $n/l_к$ расход алмазов при бурении этой коронкой может зависеть или не зависеть от числа оборотов. Это определяется принятой технологией бурения.

Бурение импрегнированными коронками происходит при свободной подаче инструмента. Пространственное расположение алмазов в матрице обеспечивает самозатачивание коронки при бурении с одной и той же нагрузкой на забой. Самозатачивание часто происходит при непосредственном контакте матрицы с породой, что снижает эффективное действие осевой нагрузки, скорость проходки и повышает расход алмазов. Особенности процесса разрушения породы при бурении однослойной коронкой относятся и к процессу бурения импрегнированной коронкой.

Примеры, рассмотренные выше, показывают, что аналитический метод исследования процессов вращательного бурения может быть полезным при решении ряда практических задач, имеющих значение для повышения производительности и снижения стоимости буровых работ. Полученные закономерности могут учитываться при разработке бурового породоразрушающего инструмента и оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Е. В., Шамшев Ф. А. Изучение технологического процесса бурения. Тр. ЦНИГРИ, вып. 95. ОНТИ, 1937.
2. Владиславлев В. С. Разрушение горных пород при бурении скважин. Гостоптехиздат, 1958.
3. Единые нормы выработки на бурение. Гостоптехиздат, 1963.
4. Остроушко И. А. Разрушение горных пород при бурении. Госгеолтехиздат, 1952.
5. Симонянц Л. Е. Разрушение горных пород. Недра, 1966.
6. Шамшев Ф. А., Млодик И. М. Материалы к технологии бурения твердыми сплавами. ОНТИ, 1936.
7. Шрейнер Л. А. Физические основы механики горных пород. Гостоптехиздат, 1950.
8. Шрейнер Л. А. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1958.
9. Эпштейн Е. Ф. Теория бурения-резания горных пород твердыми сплавами. ОНТИ, 1939.