Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова, т. XXI, вып. 2, 1976 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАБОЙНОГО ПРОЦЕССА ПРИ БУРЕНИИ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В СЛУЧАЕ ЧАСТИЧНОГО ОБНАЖЕНИЯ АЛМАЗОВ НА ТОРЦЕ БУРОВОЙ КОРОНКИ

С.Н.ТАРАКАНОВ

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ОБ ИССЛЕДУЕМОМ ЗАБОЙНОМ ПРОЦЕССЕ. Современная алмазная импрегнированная коронка может работать на забое в двух различных режимах [3]: при совершенном и несовершенном обнажении алмазов на торце коронки. Это положение относится не только к импрегнированным и многослойным коронкам, но и к однослойным, работающим при принудительной подаче.

В данной статье дана теория работы алмазной коронкой при частичном, или несовершенном, обнажении резцов. Выясним характерные черты этого забойного процесса. При недостаточном количестве обнаженных на торце коронки алмазов осевая нагрузка, прижимающая коронку к забою скважины, передается на породу через две группы резцов: элементарные резцы-алмазы и резцы-выступы шероховатости матрицы. Понятие элементарные резцы-алмазы означает, что породу разрушают как мелкие алмазы (камни), так и выступы на поверхности более крупных алмазов.

Таким образом, осевую нагрузку на забой C можно разделить на две части:

$$C = C_а + C_м , \qquad (1)$$

где $C_а$, $C_м$ – части осевой нагрузки, передаваемой на породу забоя соответственно через алмазы и через шероховатости матрицы.

Такое распределение осевой нагрузки обуславливает две составляющие механической скорости бурения. Так, например, заданная параметрами режима бурения (осевой нагрузкой на забой C и частотой вращения коронки n) начальная механическая скорость бурения, не зависимая от износа резцов,

$$S_0 = S_{0а} + S_{0м} , \qquad (2)$$

где $S_{0а}$, $S_{0м}$ – составляющие начальной механической скорости бурения, обусловленные работой резцов-алмазов и матрицы соответственно.

Введение величины S_0, как не зависимой от износа, объясняется статистическим характером забойного процесса разрушения, в котором обнажение алмазов и их износ происходят спонтанно, независимо от бурильщика. Иначе вновь обнаженный резец принимается острым; к нему и относится величина S_0. Аналогичные выражению (2) формулы можно записать для псевдоначальной скорости v_0 и для средней механической скорости бурения $v_м$. Определение

$v_м$ имеет большое практическое значение и представляет сложную задачу, решение которой требует анализа физических явлений, происходящих на забое скважины.

В связи с этим рассмотрим причину возникновения забойного процесса с частичным обнажением алмазов, его стадийность и выясним дополнительные функции, выполняемые параметрами режима бурения C и n в данном забойном процессе.

Исследуемый забойный процесс имеет место при недостаточной скорости износа матрицы коронки по отношению к скорости износа алмазов. Можно представить два вида износа матрицы: 1) при трении о породу; 2) под влиянием абразивного действия частиц разрушенной породы. Второй вид износа возникает при высоких механических скоростях бурения. При таком износе матрицы современная алмазная коронка разрушает породу при совершенном обнажении алмазов. В этом забойном процессе матрица коронки практически не вступает в непосредственный контакт с неразрушенной породой на забое и поэтому не препятствует сближению торца коронки с породой как при бурении, так и при повышении осевой нагрузки на забой. В этом случае осевая нагрузка передается на породу только через алмазы.

Другая картина наблюдается при бурении с частичным обнажением алмазов. Торец коронки и забой скважины являются волнистыми поверхностями. Чем больше осевая нагрузка на коронку тем плотнее коронка прижимается к забою, тем больше площадь контакта матрицы с породой. Так как рост осевой нагрузки вызывает и увеличение площади контакта, то среднее истинное давление $p_к$ на контакте матрицы с породой не зависит от величины C Поэтому скорость износа матрицы на контакте с породой, в любой ее точке, слабо зависит от величины нагрузки на забой. Однако повышение осевой нагрузки на коронку увеличивает площадь контакта матрицы с породой, на которой имеет место износ матрицы и обнажение алмазов.

Существенно изменить и повысить скорость износа матрицы можно только увеличением частоты вращения коронки n Это происходит за счет большей скорости износа резцов – шероховатостей матрицы при увеличении частоты вращения в начальное время работы коронки, т.е. при образовании псевдоначальной скорости v_0 .

Таким образом, кроме основных, хорошо известных функций – обеспечения необходимой глубины внедрения резцов (нагрузка C) и повышения механической скорости бурения (частота вращения коронки n указанные режимные параметры выполняют дополнительные функции: обеспечивают необходимый износ матрицы по площади и по высоте. При этом скорость износа матрицы в основном определяется частотой вращения коронки, а необходимое количество резцов-алмазов, одновременно участвующих в разрушении породы на забое, при заданной частоте вращения коронки обеспечивается осевой нагрузкой на коронку.

Так как износ матрицы коронки определен частотой вращения коронки n_x , то на некотором интервале изменения нагрузки на забой, обозначим его $(0, C_x)$, повышение C вызывает увеличение числа резцов-алмазов, вступающих в пластический контакт с породой. При этом средняя глубина внедрения одного

резца, исчисленная для всей группы одновременно внедрившихся в породу резцов, на указанном интервале, практически остается постоянной. Следовательно, и средняя осевая нагрузка на один резец C_0 должна рассматриваться постоянной, не зависимой от осевой нагрузки на забой C, принятой из интервала $(0, C_x)$.

Износ матрицы контролируется частотой вращения коронки, поэтому при заданной частоте вращения n_x повышение осевой нагрузки на забой ведет к увеличению числа резцов-алмазов, вступающих в пластический контакт породой. В этом случае независимость C_0 от C, включая C_x, определяет первую фазу забойного процесса.

При нагрузке $C = C_x$, в силу ограниченной заданной частотой вращения коронки высоты износа матрицы, будет достигнуто наибольшее для данной n_x число резцов-алмазов, вступивших в пластический контакт с породой, поэтому при осевых нагрузках на забой $C > C_x$ осевое усилие на один резец $C_0' > C_0$. Следовательно, при $C > C_x$ наступает вторая фаза забойного процесса.

В первой фазе забойного процесса механическая скорость бурения определяется числом обнаженных резцов-алмазов M_a. Во второй фазе забойного процесса механическая скорость бурения практически не зависит от числа обнаженных резцов, а определяется осевой нагрузкой на забой $C > C_x$.

На границе двух фаз одного и того же забойного процесса механическая скорость бурения максимальна, так как при $C > C_x$ значения механической скорости бурения будут соответствовать нисходящей ветви кривой $v_м = v_м(C)$, аналогичной той, которая имеет место в процессе бурения с полным обнажением алмазов.

Во второй стадии процесса, т.е. при $C_0' > C_0$ механическая скорость бурения в основном определяется ограниченным частотой вращения коронки n_x количеством обнаженных алмазов M_x, соответствующим осевой нагрузке $C_x = C(n_x)$, и нагрузкой $C > C_x$

Величина

$$M_x = \frac{C_x}{C_0}. \qquad (3)$$

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ БУРЕНИЯ. Резцы-алмазы и резцы-выступы шероховатости матрицы при образовании псевдоначальной механической скорости бурения v_0 подвергаются износу и затуплению. Износ и затупление алмазов снижает указанную скорость бурения.

Износ и затупление резцов - выступов шероховатости матрицы играют двойную роль при образовании скорости v_0 с одной стороны, уменьшают составляющую скорости $v_{0м}$ с другой, при износе и затуплении этих резцов, происходит обнажение дополнительного количества алмазов, работа которых компенсирует снижение составляющей $v_{0м}$, и, вероятно, также компенсирует снижение составляющей скорости проходки v_{0a}, обусловленное возможным тормозящим действием матрицы сближению торца коронки с породой забоя при передаче осевой нагрузки на забой на интервале $(0, C_x)$

Таким образом, износ и затупление резцов - выступов шероховатости матрицы не может оказать существенного влияния на понижение v_0 при ее обра-

зовании и, кроме того, обеспечивает свободное внедрение резцов алмазов в породу при повышении осевой нагрузки на забой от 0 до C_x.

Изложенное позволяет принять следующую схему решения задачи определения средней механической скорости бурения. Из выражения (2) находим

$$S_0 = S_{0a}\left(1 + \frac{S_{0м}}{S_{0a}}\right) \tag{4}$$

Обозначим

$$1 + \frac{S_{0м}}{S_{0a}} = K . \tag{5}$$

При свободном внедрении алмазов в породу начальная механическая скорость бурения [3]

$$v_{0a} = \frac{S_a}{\left(1 + \frac{\lambda}{\Delta_0^2}\frac{C_a}{pM_a}\sqrt{i_m}\right)^2}, \tag{6}$$

где $\lambda = 1\frac{T}{L}$ – размерный коэффициент; Δ_0 – величина, определяющая линейный размер резца алмаза; p – твердость породы; i_m – средняя скорость износа алмазов за конечное время износа $t_к$

Поэтому

$$v_0 = \frac{KS_a}{\left(1 + \frac{\lambda}{\Delta_0^2}\frac{C_a}{pM_a}\sqrt{i_m}\right)^2}. \tag{7}$$

Проходка за время $\tau = \frac{\Delta}{i_m}$, где $\Delta = \varphi(\Delta_0)$, будет

$$H = \frac{v_{0a}K\tau}{1 + \frac{\tau}{\tau}} = \frac{v_{0a}K\tau}{2} \tag{8}$$

Следовательно, средняя механическая скорость бурения

$$v_м = \frac{H}{\tau} = \frac{v_0\ K}{2} \tag{9}$$

или

$$v_м = \frac{S_{0a}K}{2\left(1 + \frac{\lambda}{\Delta_0^2}\frac{C_a}{pM_a}\sqrt{i_m}\right)^2}, \tag{10}$$

где C_a – нагрузка; M_a – количество обнаженных и одновременно работающих на забое алмазных резцов; S_{0a} и $S_{0м}$ – заданные начальные механические скорости бурения, от которых зависит коэффициент K

Перечисленные неизвестные зависят от составляющей нагрузки C_a, которую определим из формулы (I)

$$C_a = C\left(1 - \frac{C_м}{C}\right) \tag{11}$$

Обозначим

$$1-\frac{C_м}{C}=U. \qquad (12)$$

Следовательно, для определения $C_а$ необходимо знать величину U, которая, в свою очередь, зависит от составляющей осевой нагрузки на забой $C_м$. Действительно, из формулы (11) следует, что при $C_м = 0$ $C_а = C$. В этом случае все алмазы обнажены и вся осевая нагрузка передается на породу только через алмазы. При $C_м = C$ $C_а = 0$. Это означает, что обнаженных алмазных резцов нет.

Таким образом, величина U зависит от степени износа матрицы коронки и поэтому может быть определена на основе исследования износа матрицы. Определив U, можно найти и все другие неизвестные.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА МАТРИЦЫ КОРОНКИ. Пусть на конечной площади $s_{к_м}$ износа резца – шероховатости матрицы средняя удельная сила трения $f_{у_м}$ при пластическом характере контакта резца с породой определяется выражением

$$f_{у_м} = \mu_{к_м} p, \qquad (13)$$

где $\mu_{к_м}$ – коэффициент трения на площади $s_{к_м}$ для пары трения шероховатость матрицы – горная порода.

Сила трения на всей площади $s_{к_м}$

$$F_0 = \mu_{к_м} p \; s_{к_м} = \mu_{к_м} c_{0м}, \qquad (14)$$

где $c_{0м}$ – осевая нагрузка на одну шероховатость, исчисленная как средняя для группы внедрившихся в породу резцов-шероховатостей.

Количество резцов-шероховатостей

$$M_м = \frac{C_м}{s_{к_м} p} = \frac{C_м}{c_{0м}}. \qquad (15)$$

Общая сила трения на матрице

$$F_м = F_0 M_м, \qquad (16)$$

или

$$F_м = \mu_{к_м} C_м \qquad (17)$$

Разделим обе части равенства (17) на площадь $S_м$, представляющую собой часть полной геометрической площади коронки $S_{т.к}$, занятой резцами-шероховатостями:

$$\frac{F_м}{S_м} = \mu_{к_м} \frac{C_м}{S_м}. \qquad (18)$$

Отношение $F_м / S_м = f_м$ – средняя удельная сила трения на контакте матрицы с породой. Отношение $C_м / S_м = q_м$ – среднее удельное (контурное) давление на контакте матрицы с породой. В частном случае, когда $C_а = 0$ и, следовательно, $C_м = C$

$$f_м = \mu_{к_м} \frac{C}{S_{т.к}} = \mu_{к_м} q, \qquad (19)$$

где $S_{т.к}$ – площадь торца коронки; q – удельная нагрузка на забой (технологическая), кгс/мм^2.

В общем случае

$$\frac{C}{S_{т.к}} = \frac{C_м + C_а}{S_м + S_а} = \frac{C_м}{S_м} \cdot \frac{1 + \frac{C_а}{C_м}}{1 + \frac{S_а}{S_м}}, \qquad (20)$$

где $S_а$ – часть площади торца коронки, занятая обнаженными алмазами.

Можно предположить, что выполняется условие

$$\frac{C_а}{C_м} = \frac{S_а}{S_м}, \qquad (21)$$

указывающее на то, что составляющие осевой нагрузки прямо пропорциональны площадям, занимаемым соответствующими этим нагрузкам резцами. В этом случае второй множитель формулы (20) равен 1. И, следовательно,

$$\frac{C}{S_{т.к}} = \frac{C_м}{S_м} \qquad (22)$$

Или, что то же,

$$q = q_м. \qquad (23)$$

Таким образом, средняя удельная нагрузка $q_м$ на части матрицы, занятой резцами-пероховатостями, всегда равна удельной (технологической) нагрузке q. Поэтому можно записать

$$f_м = \mu_{к_м} q \qquad (24)$$

При износе заостренного пластинчатого резца среднее значение удельной силы трения на конечной площади износа $S_к = S(t_к)$ определяется формулой

$$f = \mu_к p, \qquad (25)$$

где $\mu_к$ – коэффициент трения на контакте резца-алмаза с породой.

Формулы (24) и (25) аналогичны по структуре. Поэтому матрицу коронки по износу можно заменить заостренным пластинчатым резцом, у которого средняя сила трения на границе фаз объемного и усталостного разрушения породы (при $t = t_к$) определяется не твердостью породы p, а удельной нагрузкой q.

Эта аналогия позволяет определить ряд соотношений, относящихся к износу матрицы. Например, средняя скорость износа заостренного пластинчатого резца (при $t = t_к$)

$$i_m = 2\omega\mu_к p\pi D n, \qquad (26)$$

где ω – коэффициент объемного износа резца, $\left[\frac{L^3}{FL}\right]$; D – средний диаметр буровой коронки.

Для матрицы запишем

$$i_{m_м} = 2\omega_м \mu_{к_м} q\pi D n, \qquad (27)$$

где $\omega_м$ – коэффициент объемного износа матрицы.

Полное время работы заостренного пластинчатого резца

$$t_к = \frac{y_к}{2\omega\mu_к p\pi Dn}, \qquad (28)$$

где $y_к$ – полный износ лезвия резца по высоте за время $t_к$

Для матрицы коронки

$$t_м = \frac{y_{км}}{2\omega_м\mu_{км} q\pi Dn}, \qquad (29)$$

где $y_{км}$ – износ матрицы по высоте, при котором все алмазы обнажены.

При $C = q\pi Db$ (где $\pi Db \cong S_{т.к}$; b – радиальная ширина матрицы)

$$t_м = \frac{y_{км} b}{2\omega_м\mu_{км} Cn} \qquad (30)$$

При полном обнажении алмазов $t_м = t_{км}$ и поэтому

$$t_{км} = \frac{y_{км} b}{2\omega_м\mu_{км} C_{ак} n_к}, \qquad (31)$$

где $C_{ак}$ – осевая нагрузка на забой при полном обнажении алмазов.

Осевая нагрузка $C_{ак}$ может быть передана только при частоте вращения коронки $n_к > n_x$, поскольку величина нагрузки контролируется частотой вращения коронки. Когда $C < C_{ак}$, то $y_м < y_{км}$ и $t_м < t_{км}$

В формулу псевдоначальной механической скорости бурения

$$v_0 = \frac{S_0}{\left(1 + \frac{\theta}{t_к}\right)^2}, \qquad (32)$$

относящуюся к коронке, армированной заостренными пластинчатыми резцами, входит постоянная времени θ Физический смысл этой величины описан в работе [3] . Появление этого параметра обусловлено высокой скоростью износа резца при образовании v_0 за время Δt За это время износ резца определяется выражением

$$y = y_к\sqrt{\frac{\Delta t\,\varepsilon}{t_к}} = y_к\sqrt{\frac{\theta}{t_к}} \qquad \text{при } \theta \le t_к \qquad (33)$$

Аналогичную формулу можно записать для матрицы коронки:

$$y_м = y_{км}\sqrt{\frac{\theta_м}{t_м}} \qquad \text{при } t_м \le \theta_м . \qquad (34)$$

Докажем, что искомый параметр U определяется так:

$$U = \frac{\theta_м}{t_м} . \qquad (35)$$

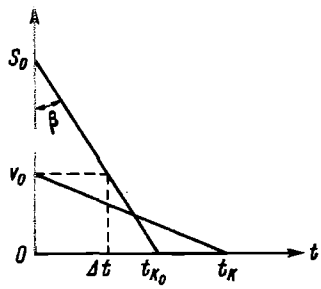
Зависимость $H=H(t)$ (проходка – время бурения) для коронки с заостренными пластинчатыми резцами может быть определена на основе двух функций [3]

$$\frac{dH}{dt} = S_0\left(1-\frac{t}{t_{к_0}}\right); \tag{36}$$

$$\frac{dH}{dt} = v_0\left(1-\frac{t}{t_к}\right) \tag{37}$$

Формула (36) относится к начальному периоду работы коронки при аномально высоких скоростях износа резцов. Формула (37) относится к периоду работы коронки с нормальным износом резца.

Из геометрического построения этих функций (см. рисунок) находим



Изменение мгновенной механической скорости бурения, выраженное в линейных функциях $v=v(t)$ для двух стадий забойного процесса: начальной и установившейся по износу резцов

$$tg\beta = \frac{t_{к_0}}{S_0}. \tag{38}$$

Поэтому

$$\Delta t = \frac{S_0-v_0}{S_0}\,t_{к_0} = \frac{\delta_0-h_0}{\delta_0}\,t_{к_0}. \tag{39}$$

В работе [3] показано, что

$$\frac{\Delta t}{t_{к_0}} = \frac{\theta}{t_к}, \tag{40}$$

поэтому

$$\frac{\theta}{t_к} = 1-\frac{h_0}{\delta_0}. \tag{41}$$

Для пластинчатого заостренного резца начальная глубина разрушения породы

$$\delta_0 = \frac{c_0}{apb_л tg\alpha}, \tag{42}$$

где c_0 – осевая нагрузка на резец; α – угол заострения лезвия; $b_л$ – длина лезвия; a – коэффициент, характеризующий структуру начальной глубины разрушения горной породы.

Так как $h_0 \le \delta_0$, то представим

$$h_0 = \eta\delta_0, \quad \eta \le 1.$$

Тогда

$$h_0 = \frac{\eta c_0}{apb_л tg\alpha}. \tag{43}$$

Обозначим $\eta c_0 = c_{0_1}$.

Очевидно, что отношение

$$\frac{h_0}{\delta_0} = \frac{c_{0_1}}{c_0} \tag{44}$$

Следовательно,

$$\frac{\theta}{t_к} = 1 - \frac{c_{0_1}}{c_0}. \qquad (45)$$

Матрица коронки рассматривается как пластинчатый резец, износ которого на границе двух фаз разрушения породы определяется величиной q. Поэтому, на основании аналогии выражения (45) с ранее определенной формулой (I2), можно написать

$$U = \frac{\theta_м}{t_м}, \qquad (46)$$

где $t_м \leq t_{к_м}$.

Таким образом, искомая нагрузка

$$C_a = CU = C\frac{\theta_м}{t_м}. \qquad (47)$$

Ранее было показано, что величина осевой нагрузки C на забой в первой стадии забойного процесса, т.е. при $C_0 = const$, контролируется частотой вращения коронки. Поэтому выражение (47) запишем в следующем виде:

$$C_a = C\frac{n}{n_к}, \qquad (48)$$

где

$$n_к = \frac{y_{к_м} b}{\theta_м 2\omega_м \mu_{к_м} C_{a_к}} \qquad (49)$$

Из формулы (48) следует, что при $n = n_к$ $C_a = C = C_{a_к}$.

Так как в данном процессе осевую нагрузку $C_{a_к}$ можно эффективно передать на забой только при частоте вращения коронки $n_к$, то величина $C_{a_к} n_к = A_к$ – постоянная данного процесса.

Определение M_a, $C_м$ и K, зависимых от U, произведено ниже.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ БУРЕНИЯ. Начальную механическую скорость бурения определим известной формулой

$$S_{0a} = \frac{k_1 C_a n}{apb}, \qquad (50)$$

где k_1 – коэффициент, характеризующий геометрию резца.

Подставляя в формулу (50) нагрузку C_a, получаем

$$S_0 = \frac{k_1 C n^2}{apb n_к}. \qquad (5I)$$

Мысленно организуем группу опытов, для которых C и n выбираются из условия

$$Cn = C_x n_x = A = const. \qquad (52)$$

Здесь C_x и n заданы, причем $C \leq C_x$ и $n \geq n_x$.

При таком бурении

$$S_0 = \frac{k_1 A n}{apbn_к}. \tag{53}$$

Прямая пропорциональная зависимость скорости S_0 от n показывает, что во всех опытах на забое работает одно и то же число обнаженных алмазов $M_a = M_x = const$.

Определим количество обнаженных резцов-алмазов с учетом условия

$$\frac{y_м}{M_a} = \frac{y_{км}}{M_{aк}} = c_1, \tag{54}$$

записанного на основании выражения (3). Здесь $1/c_1$ – количество приращенных резцов-алмазов, приходящееся на единицу износа матрицы.

Тогда

$$M_a = \frac{M_{aк} y_м}{y_{км}}. \tag{55}$$

Так как

$$y_м = y_{км}\sqrt{\frac{\theta_м}{t_м}}, \tag{56}$$

то

$$M_a = M_{aк}\sqrt{\frac{\theta_м}{t_м}} \text{ при } t_м \leq t_{км} \tag{57}$$

Для определения K необходимо найти составляющую осевой нагрузки $C_м$. Известно, что $C_м = C - C_a$ или $C_м = C(1 - C_a/C)$. Так как $C_a/C = U$, то

$$C_м = C(1-U). \tag{58}$$

Представим

$$U = \frac{Cn}{A_к}.$$

Тогда

$$C_м = C\left(1 - \frac{Cn}{A_к}\right) \tag{59}$$

Поскольку при $n = n_к$ $C_м = 0$, можем записать:

$$0 = \frac{C_{aк} n_к}{n_к}\left(1 - \frac{C_{aк} n_к}{A_к}\right).$$

Очевидно, что при всех $n \leq n_к$

$$C_м = \frac{Cn}{n_к}\left(1 - \frac{Cn}{A_к}\right) > 0$$

и при $Cn = A_к$ $C_м = 0$.

Определим составляющую скорости $S_{0м}$ так:

$$S_{0м} = \frac{k_1 C_м n}{apb}. \tag{60}$$

При написании уравнения (60) мы приняли, что геометрическая форма резцов - выступов шероховатости не отличается от формы элементарных резцов-алмазов. При этом условии

$$S_{0м} = \frac{k_1 C n^2}{apbn_к}\left(1 - \frac{Cn}{A_к}\right),$$

или

$$S_{0м} = S_{0a}\left(1 - \frac{Cn}{A_к}\right).$$

Искомое отношение

$$\frac{S_{0м}}{S_{0a}} = 1 - \frac{Cn}{A_к}.$$

Поэтому

$$K = 1 + \left(1 - \frac{Cn}{A_к}\right) = 2 - \frac{Cn}{A_к} \qquad (61)$$

Таким образом, начальная механическая скорость бурения

$$S_0 = \frac{k_1 C n^2}{apbn_к}\left(2 - \frac{Cn}{A_к}\right). \qquad (62)$$

Средняя механическая скорость бурения

$$v_м = \frac{k_1 C n^2}{2apbn_к} \frac{\left(2 - \frac{Cn}{A_к}\right)}{\left(1 + \frac{\lambda}{\Delta_0^2}\frac{1}{p}\frac{Cn}{M_a n_к}\sqrt{i_m}\right)} \qquad (63)$$

Входящее в эту формулу число резцов

$$M_a = M_{aк}\sqrt{\frac{Cn}{A_к}},$$

или

$$M_a = M_{aк}\sqrt{\frac{q\pi Dbn}{A_к}} \qquad (64)$$

для $q = const$, D и n переменных.

Приведем примеры применения формулы (63) к решению технологических задач.

I. Определим среднюю механическую скорость бурения и массовый расход алмазов на единицу проходки при бурении групповой коронок при переменных параметрах режима бурения C и n, выбираемых из условия (52), которое соответствует работе коронки при постоянной мощности, реализуемой на забое.

Для решения задачи представим

$$M_a = M_x\sqrt{\frac{C}{C_x}}, \qquad (65)$$

где

$$M_x = M_{a_K}\sqrt{\frac{A}{A_K}}. \qquad (66)$$

При подстановке M_a в формулу (63) получим

$$v_M = \frac{k_1}{2apb}\,\frac{n}{n_K}\,\frac{A\left(2-\frac{A}{A_K}\right)}{\left(1+\frac{\lambda}{\Delta_0^2}\,\frac{1}{p}\,\frac{Cn}{M_x n_K}\sqrt{\frac{C_x}{C}\,i_m}\right)} \qquad (67)$$

Из условия (52) находим

$$\frac{C_x}{C} = \frac{n}{n_x}$$

При подстановке этого отношения в выражение (67) имеем

$$v_M = \frac{k_1}{2apb}\,\frac{n}{n_K}\,\frac{A\left(2-\frac{A}{A_K}\right)}{\left(1+\frac{\lambda}{\Delta_0^2}\,\frac{1}{p}\,\frac{An}{M_x n_K}\sqrt{\frac{3\omega\mu_K p\pi D}{n_x}}\right)^2} \qquad (68)$$

Механическая скорость бурения, определяемая формулой (68), имеет максимальное значение при

$$n_0 = \frac{\Delta_0^2 p}{A}\,\frac{M_x n_K n_x}{\lambda\sqrt{i_m(n_x)}} = \frac{\Delta_0^2 p}{C_0}\,\frac{n_x}{\lambda\sqrt{i_m(n_x)}}\,, \qquad (69)$$

где

$$C_0 = \frac{C_x n_x}{M_x n_K} = \frac{C_a}{M_x}$$

Максимум механической скорости бурения

$$v_{M\,max} = \frac{k_1}{2apb}\,\frac{n_0}{n_K}\,\frac{A\left(2-\frac{A}{A_K}\right)}{4}\,.$$

При подстановке в эту формулу n_0 получим

$$v_{M\,max} = \frac{k_1}{8apb}\,\frac{\Delta_0^2 p M_x\left(2-\frac{A}{A_K}\right)n_x}{\lambda\sqrt{i_m(n_x)}}$$

С учетом формулы (66)

$$v_{M\,max} = \frac{k_1}{8apb}\,\frac{\Delta_0^2 p M_{a_K}\sqrt{\frac{A}{A_K}}\left(2-\frac{A}{A_K}\right)n_x}{\lambda\sqrt{i_m(n_x)}}\,, \qquad (70)$$

где

$$i_m(n_x) = 8\omega\mu_K p\pi D n_x\,.$$

Функция

$$\Phi = \sqrt{\frac{A}{A_K}}\left(2-\frac{A}{A_K}\right)$$

мало отличается от 1 на всем возможном интервале изменения A от 0 до A_K:

$\frac{A}{A_к}$	1/4	1/3	2/3	1
Φ	0,875	0,965	1,085	1,0

Функция Φ принимает максимальное значение при $A/A_к=\frac{2}{3}$, поэтому

$$v_{M\,max} \cong \sqrt{n_x} \tag{71}$$

При $n=n_к$, т.е. при переходе от процесса разрушения породы с частичным обнажением резцов к процессу с полным их обнажением, выражение (70) переходит в следующее:

$$v_{M\,max}=\frac{k_1}{8apb}\,\frac{\Delta_0^2 p M_{a_к} n_к}{\lambda\sqrt{i_m(n_к)}}\,, \tag{72}$$

где $\left(\Delta_0^2 p M_{a_к}\right)/\left(\lambda\sqrt{i_m(n_к)}\right)=C_к$ – критическая осевая нагрузка на забой в случае полного обнажения алмазов при бурении с частотой вращения коронки $n=n_к$.

Следовательно, механическая скорость бурения, определяемая формулой (72), численно равна максимальной механической скорости бурения для случая совершенного обнажения алмазов (при $n=n_к$).

Из выражения (71) можно видеть, что максимум скорости, полученный из условия (65), пропорционален $\sqrt{n_x}$. Следовательно, на повышение максимума механической скорости бурения в данном примере решающее влияние оказывает частота вращения n_x, определяющая условие (52).

Определим массовый расход алмазов на единицу проходки при частоте вращения коронки n_0.

Проходка за конечное время τ

$$H=v_{M\,max}\tau\,,$$

где

$$\tau=\frac{k_1\Delta_0}{3\omega\mu_к p\pi D n_0}$$

Массовый расход алмазов на единицу проходки

$$I=\frac{Q}{H}\,,$$

где

$$Q=\frac{M_{a_к}\pi\Delta_0^3}{6}\gamma\,;$$

Q – массовое содержание алмазов в одном слое коронки; γ – плотность алмазов; $\Delta_0=d$ – средний диаметр алмаза.

Проходка

$$H=\frac{k_1^2\Delta_0 A\left(2-\frac{A}{A_к}\right)}{8apb\cdot 3\omega\mu_к p\pi D n_к}$$

Поэтому

$$I=\frac{M_{a_к}\pi\Delta_0^3\gamma}{6}\,\frac{8apb\cdot 3\omega\mu_к p\pi D n_к}{k_1^2\Delta_0 A\left(2-\frac{A}{A_к}\right)}$$

Умножим числитель и знаменатель полученного выражения на $\sqrt{\frac{A}{A_к}}$ и обозначим $\frac{A}{M_x n_к} = C_0$ Тогда при $a = 3/4$

$$I = \frac{3\pi\gamma\omega\mu_к p\pi Db}{k_1^2\sqrt{\frac{A}{A_к}}\left(2-\frac{A}{A_к}\right)} \frac{p\Delta_0^2}{C_0}$$

Из формулы (69) находим

$$\frac{p\Delta_0^2}{C_0} = \frac{n_0\lambda\sqrt{i_m(n_x)}}{n_x}$$

Следовательно,

$$I = \frac{3\pi\gamma\omega\mu_к p\pi Db}{k_1^2} \frac{\lambda\sqrt{i_m(n_0)}\sqrt{\frac{n_0}{n_x}}}{\sqrt{\frac{A}{A_к}}\left(2-\frac{A}{A_к}\right)}$$

Формула

$$I_{min} = \frac{3\pi\gamma\omega\mu_к p\pi Db}{k_1^2}\lambda\sqrt{i_m(n_0)}$$

определяет минимальный массовый расход алмазов в забойном процессе при совершенном обнажении алмазов на торце коронки при $n = n_0$ Поэтому

$$I(n_0) \cong I_{min}\sqrt{\frac{n_0}{n_x}}$$

Так как $n_0 \geq n_x$, то массовый расход алмазов в процессе бурения с частичным обнажением резцов (при $n > n_0$) больше минимального массового расхода алмазов в процессе с полным обнажением алмазов.

Заметим, что равенство $I = I_{min}$ соответствует $n_x = n_к = n_0$, т.е. границе двух процессов.

Максимум механической скорости бурения в процессе с совершенным обнажением алмазов (при $n = n_0$)

$$v'_{м\,max} = \frac{k_1}{8apb}\frac{\Delta_0^2 p M_{a_к} n_0}{\lambda\sqrt{i_m(n_0)}}$$

Максимум механической скорости бурения в процессе с частичным обнажением алмазов (при n_0) определяется выражением (70). Отношение скоростей

$$\frac{v'_{м\,max}}{v_{м\,max}} = \sqrt{\frac{n_0}{n_x}}\frac{1}{A\left(2-\frac{A}{A_к}\right)}$$

Так как $A\left(2-\frac{A}{A_к}\right) \cong 1$ то для $n_0 > n_x$

$$\frac{v'_{м\,max}}{v_{м\,max}} \cong \sqrt{\frac{n_0}{n_x}}$$

Таким образом, при максимальной механической скорости бурения в процессе с частичным обнажением алмазных резцов расход алмазов выше, а максимальная механическая скорость бурения меньше в $\sqrt{\frac{n_x}{n_0}}$ раза.

Запишем формулу (68) в следующем виде:

$$v_м = \frac{k_1}{2apb} \frac{A\frac{n}{C}}{\left(\frac{1}{\sqrt{C}} + \frac{\lambda}{\Delta_0^2}\frac{A}{M_x n_к}\frac{n}{C}\sqrt{\frac{3\omega\mu_к p\pi DC}{n_x}}\right)^2}$$

Это выражение получено делением числителя и знаменателя формулы (68) на C и умножением корня квадратного в скобках указанной формулы на $\sqrt{\frac{C}{C}}$. При $A = const$ скорость бурения оказалась выраженной в функции отношения $\frac{n}{C}$. Она имеет максимум при $\frac{n_0}{C}$, где $C = \frac{A}{n_0}$ и $\left(\frac{1}{\sqrt{C}} + \sqrt{C}\right)^2 \approx const$.

Эмпирическую зависимость $v_м = v_м\left(\frac{n}{C}\right)$ нашел И.И.Петров [2], проводивший бурение многослойной коронкой при заданном уровне мощности на забое.

2. Рассмотрим бурение коронками разных диаметров при постоянной удельной нагрузке на забой q.

Для определения механической скорости бурения в этом примере представим

$$M_а = M_{а к}\sqrt{\frac{q\pi Dbn}{A_к}},$$

где $q\pi Db = C$ – осевая нагрузка на забой.

При подстановке этого выражения в формулу (63), получаем

$$v_м = \frac{k_1}{2ap}\frac{n}{n_к}\frac{q\pi Dn\left(2 - \frac{q\pi Dbn}{A_к}\right)}{\left(1 + \frac{\lambda}{\Delta_0^2}\frac{1}{p}\frac{q\pi Dbn}{M_{а к} n_к}\sqrt{\frac{3\omega\mu_к pA}{qb}}\right)^2} \qquad (73)$$

Запишем

$$M_{а к} = \frac{C_{а к}}{c_0} \quad и \quad C_{а к} n_к = A_к$$

После подстановки этих величин в формулу (73), имеем

$$v_м = \frac{k_1}{2ap}\frac{n}{n_к}\frac{q\pi Dn\left(2 - \frac{q\pi Dn}{A_{к_0}}\right)}{\left(1 + \frac{\lambda}{\Delta_0^2}C_0\pi Dn\sqrt{B\frac{q}{p}}\right)^2} \qquad (74)$$

Здесь постоянная

$$B = \frac{3\omega\mu_к 2\omega_м\mu_{к м}\theta_м}{\gamma_{к м}}, \quad \left[\frac{L^4}{F^2}\frac{T}{L}\right]$$

и $A_{к_0} = \frac{A_к}{b}$.

Формула (74) справедлива в случае, если $n_к$ не зависит от D. Докажем это.

Износ матрицы коронки при заданной частоте вращения n происходит тем интенсивнее, чем больше диаметр коронки. Согласно изложенной теории, полное обнажение алмазных резцов произойдет за время $t_{м к} = \theta_м$, которое по своей природе не зависит от D. Согласно формуле (74)

$$A_к = q_к \pi D_к b n_к$$

Примем в этом выражении

$$q_к = \frac{const}{D_к},$$

где $q_к$ – удельная нагрузка, соответствующая коронке с диаметром $D_к$, при которой полный износ матрицы произойдет за постоянное время $t_{к_м} = \theta_м$. Следовательно,

$$A_к = \frac{y_{к_м} b}{2\theta_м \mu_{к_м} \omega_м} = q_к \pi D_к b n_к$$

Отсюда

$$n_к = \frac{y_{к_м} b}{2\theta_м \mu_к q_к \pi D_к b \omega_м}.$$

Поскольку $q_к D_к = const$, то $n_к$ не зависит от D.

Формула (74) подтверждена различными экспериментальными данными. Например, опытное бурение по граниту производилось на стенде ВИТРа однослойными коронками пяти диаметров, специально изготовленными, а также частично подобранными из стандартных для осуществления эксперимента. Проходка на коронку составляла I м, удельная нагрузка принималась I,8 кгс/мм^2. Эксперимент проведен Д.А.Оношко по методике, согласованной с автором.

Бурение коронками разных диаметров производилось при постоянной окружной скорости $\pi D n$ и постоянной осевой нагрузке на один алмаз C_0.

Условия проведения экспериментов и их результаты представлены в таблице [I].

Постоянство отношения $\frac{v_м}{n}$ и объемной механической скорости бурения $v_{об} \cong k n \pi D b$ хорошо подтверждает формулу (74).

Исходные данные и результаты эксперимента при бурении по граниту

Диаметр коронок, мм	Крупность алмазов, шт./карат	Осевое усилие на коронку, кгс	Частота вращения коронки, об/мин	cn, $\frac{кг \cdot об}{мин}$	Окружная скорость коронки, м/мин	Нагрузки на алмаз, кгс	Средняя механическая скорость бурения, мм/мин	Отношение $\frac{v_м}{n}$, мм/об	Объемная скорость бурения, мм^3/мин
59	36	1700	193	$34 \cdot 10^4$	30	9,7	10	0,0052	9400
46	20-30	1000	281	$28 \cdot 10^4$	33	10,0	15	0,0055	8300
36	37	650	877	$32 \cdot 10^4$	31	9,0	21	0,0057	9900
24	40	450	699	$31,4 \cdot 10^4$	39	10,5	33	0,0048	9800

ЛИТЕРАТУРА

Волосюк Г.К. Эффективность бурения скважин инструментом малого диаметра. „Разведка и охрана недр", 1969, № 3.

2. Петров И.П. Автоматическое регулирование работы буровых установок. В кн.: „Совершенствование техники и технологии разведочного бурения". М., „Недра", 1968.

3. Технология и техника разведочного бурения. М., „Недра", 1973. Авт.: Ф.А.Шамшев, С.Н.Тараканов, Б.Б.Кудряшов, Ю.М.Парийский, А.М.Яковлев, Е.А.Салье.