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

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА АЛМАЗОВ БУРОВЫХ КОРОНОК

Л. К. Горшков, Ю. М. Парийский

В силу особой чувствительности алмазов к действию температурного фактора соблюдение нормального теплового режима алмазных коронок в процессе бурения является одним из основных условий их эффективной работы. Нормальным следует считать такой тепловой режим, при котором температура нагрева алмазов не достигает величины, вызывающей их окисление, графитизацию или деформации вследствие температурных напряжений.

Анализ литературных данных о температурах нагрева, при которых окисляются алмазы, показывает, что единого мнения по этому вопросу нет [3, 7, 8]. Предпочтение, вероятно, нужно отдать данным УкрНИИСТМ как наиболее современным и относящимся к отечественным алмазам [3]. В связи с этим нормальной температурой нагрева алмазов при бурении будем считать температуру ниже 600—650°С.

Для получения аналитической зависимости, отражающей влияние многочисленных факторов на тепловой режим алмазной коронки, рассмотрим нагрев и охлаждение системы, состоящей из трех различных по теплофизическим свойствам звеньев: алмаз, матрица, короночное кольцо.

Мелкоалмазную коронку с колонковой трубой с достаточной степенью точности можно принять за полый вал, к одному концу которого подводится тепловой поток, воспринимаемый в первую очередь алмазными зернами. Далее, в соответствии с известными законами теплопередачи, тепловой поток распространяется по телу матрицы и короночного кольца, с поверхностей которых отводится циркулирующим в призабойной зоне очистным агентом.

Обозначим суммарную площадь поперечных сечений алмазов в месте их контакта с породой $f_а$ и периметр $П_а$ (сумма периметров отдельных алмазов). Допустим, что температура агента в призабойной зоне постоянна по величине и коэффициент теплоотдачи α также постоянен для всей поверхности коронки.

Для удобства дальнейших выкладок отсчет температуры будем вести от $t_р$=const (температура циркуляционной среды в призабойной зоне). Отсчитанную таким образом температуру (избыточную) обозна-

чим через θ. Тогда

$$\theta = t - t_р, \qquad (1)$$

где t—текущее значение температуры, °С.

Если задаться температурой режущей грани алмаза $t_а$, то избыточная температура

$$\theta_а = t_а - t_р. \qquad (2)$$

На расстоянии x от начала режущей грани алмаза выделим элемент длиной dx (рис. 1). Уравнение теплового баланса для рассматриваемого элемента можно записать в следующем виде

$$Q_x - Q_{x+dx} = dQ, \qquad (3)$$

где Q_x—количество тепла, входящее в элемент за единицу времени, *ккал/ч*; Q_{x+dx}—количество тепла, выходящее из противоположной стороны элемента, *ккал/ч*; dQ—количество тепла, отдаваемого за единицу времени наружной поверхностью элемента в окружающую среду, *ккал/ч*.

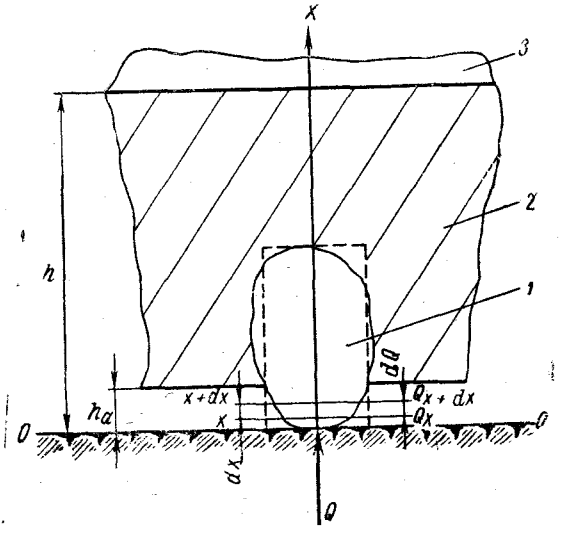


Рис. 1. К расчету температуры нагрева режущих граней алмазов

1—алмаз; *2*—матрица; *3*—кольцо

Согласно закону Фурье [4]

$$Q_x = -\lambda_а \frac{d\theta}{dx} f_а$$

и

$$Q_{x+dx} = -\lambda_а \frac{d}{dx}\left(\theta + \frac{d\theta}{dx}dx\right) f_а,$$

откуда

$$Q_{x+dx} = -\lambda_а f_а \frac{d\theta}{dx} - \lambda_а f_а \frac{d^2\theta}{dx^2} dx.$$

Следовательно,

$$Q_x - Q_{x+dx} = \lambda_а f_а \frac{d^2\theta}{dx^2} dx, \qquad (4)$$

где $\lambda_а$—теплопроводность алмаза, *ккал/ч·°С*.

С другой стороны, согласно закону Ньютона—Рихмана [4]

$$dQ = \alpha\theta\Pi_а dx. \qquad (5)$$

Приравнивая выражения (4) и (5), получим следующее дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры в зернах алмазов,

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{\alpha\Pi_а}{\lambda_а f_а}\theta = m^2\theta, \qquad (6)$$

где

$$m = \sqrt{\frac{\alpha\Pi_а}{\lambda_а f_а}}, \quad 1/м. \qquad (7)$$

Из выражения (7) следует, что при условии постоянства коэффициента теплоотдачи α и постоянства $\lambda_а$ в рассматриваемом интервале температур $m=\text{const}$.

Аналогичным образом получаются дифференциальные уравнения изменения температур в теле матрицы и короночного кольца

$$\frac{d^2\theta'}{dx^2}=n\theta' \tag{8}$$

и

$$\frac{d\theta''}{dx^2}=p^2\theta'', \tag{9}$$

где $n=\sqrt{\frac{\alpha\Pi_м}{\lambda_м f_м}}$ и $p=\sqrt{\frac{\alpha\Pi_к}{\lambda_к f_к}}$; θ', θ''—избыточные температуры соответственно для матрицы и короночного кольца, °С; $f_м$, $f_к$—площади поперечного сечения соответственно матрицы и короночного кольца, $м^2$; $\Pi_м$, $\Pi_к$—полные („смоченные") периметры соответственно матрицы и корпуса коронки, $м$; $\lambda_м$, $\lambda_к$—теплопроводности соответственно материала матрицы и корпуса коронки, $ккал/м\cdot ч\cdot$°С.

Совместное решение уравнений (6), (8) и (9) с привлечением известных зависимостей теории теплопередачи позволит получить выражение для расчета нагрева режущих граней алмазов при бурении; предварительно же необходимо определить величину теплового потока, уходящего в окружающую среду путем конвективного теплообмена на выступающих частях алмазных зерен,

$$Q_в=\alpha F_а\Delta t=\alpha F_а(t_а-t_р), \tag{10}$$

где $Q_в$—количество тепла, отводимого от поверхности выступающих частей алмазных зерен, $ккал/ч$; $F_а$—поверхность выступающих частей алмазов, $м^2$.

Расчет показывает, что при бурении коронкой типа МВ1-59 с осевой нагрузкой 1000 $кГ$ и при скорости вращения 237 $об/мин$ (забойная мощность $N=3$ $л.с.$) относительная величина теплового потока, снимаемого с выступающих частей алмазов, не превышает 5% (в случае применения продувки) и 9—10% (в случае использования промывочных жидкостей) от всего теплового потока, поступающего в коронку, даже при разности температур алмазов и циркуляционной среды, равной 600°С.

По мере износа алмазов и снижения забойной мощности количество тепла, отводимого непосредственно от алмазов в циркулирующую среду, постоянно уменьшается. Поэтому без большой погрешности можно считать, что все тепло, идущее на нагрев коронки, поступает через алмазы в ее матрицу. О справедливости этого допущения свидетельствует и тот факт, что многие зерна алмазов не имеют непосредственного контакта с циркулирующей средой, так как бóльшая часть циркуляционного агента проходит через торцевые канавки, не омывая алмазов.

Выражение для расчета нагрева режущих граней алмазов при бурении [1] имеет вид

$$t_а=\frac{Q\left[1-\frac{f_а}{f_м}\cdot\frac{2p\frac{\lambda_к f_к}{\lambda_м f_м}\varphi+e^{nh}(2n-1)-e^{-nh}}{2p\frac{\lambda_к f_к}{\lambda_м f_м}+n(e^{nh}-e^{-nh})}\right]}{\lambda_а f_а m}+t_р, \tag{11}$$

где Q—количество тепла, поступающее в коронку, *ккал/ч*; h—высота матрицы, *м*; φ—коэффициент, учитывающий изменение температуры по высоте матрицы коронки и представляющий собой отношение температуры верхней границы матрицы к температуре торца ($\varphi=0{,}78\div0{,}82$).

Формула (11) позволяет рассчитывать температуры нагрева режущих граней алмазов при различных сочетаниях технологических (параметры режима бурения и циркуляционной среды), конструктивных (размеры алмазов, насыщенность торца алмазами, размеры матричного и короночного колец, геометрия циркуляционной системы) и теплофизических факторов (теплопроводность алмазов, матрицы и короночного кольца, температуропроводность их и т. д.), а также при любых значениях теплофизических и физико-механических свойств буримых горных пород.

Для выяснения погрешности и практической годности формулы (11) проводились экспериментальные замеры температур в матрице коронки на разных расстояниях от торца. В качестве датчиков температуры использовались хромель-копелевые термопары, встраиваемые в тело коронки. Сигналы от датчиков регистрировались самопищущим потенциометром ПС1-01. Результаты замеров сравнивались с данными расчетов по специально выведенной формуле для определения температуры нагрева матрицы при бурении с продувкой [1]

$$t_т=\frac{Q\left(e^{nh}+e^{-nh}\right)}{\lambda_м f_м\left[2p\,\frac{\lambda_к f_к}{\lambda_м f_м}\varphi+n\left(e^{nh}-e^{-nh}\right)\right]}+t_р. \qquad (12)$$

По формуле (12) получены значения температур нагрева матрицы на различных расстояниях от торца, при различных значениях забойной мощности и заданных значениях высоты матрицы h в соответствии с глубинами закрепления термодатчиков. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает достаточную их сходимость, что свидетельствует о возможности практического использования формулы (12), полученной в результате совместного решения выражений (8) и (9), а равно и формулы (11), так как последняя выведена аналогичным образом.

Влияние технологических параметров режима бурения в формуле (11) учитывается величиной Q, которая находится в прямой зависимости от значения забойной мощности N,

$$Q=633kN, \qquad (13)$$

где k—коэффициент нагрева коронки, зависящей от теплофизических свойств алмазов и буримых пород [2].

Величина забойной мощности связывается с осевой нагрузкой и скоростью вращения следующей зависимостью [6]

$$N=0{,}384\,\frac{\pi C n_{вр} d_{ср}}{75\cdot60},\ л.с., \qquad (14)$$

где C—осевая нагрузка, *кГ*; $n_{вр}$—скорость вращения снаряда, *об/мин*; $d_{ср}$—средний диаметр матричного кольца, *м*.

Для правильного выбора технологических параметров режима бурения, при которых температура нагрева алмазов не превышает допустимого значения, необходимо определить предельные уровни забойной мощности (критические мощности) при использовании цирку-

ляционных агентов, отличающихся по своим теплофизическим свойствам (промывочные жидкости и сжатый воздух). С этой целью перепишем формулу (11)

$$Q=(t_a-t_p)\,K_0, \tag{15}$$

где

$$K_0=\frac{\lambda_a f_a m}{1-\frac{f_a}{f_м}\cdot\frac{2p\frac{\lambda_к f_к}{\lambda_м f_м}\varphi+e^{nh}(2n-1)-e^{-nh}}{2p\frac{\lambda_к f_к}{\lambda_м f_м}\varphi+n(e^{nh}-e^{-nh})}}. \tag{16}$$

Величина K_0 в выражении (16) есть функция m, n, p, т. е. $K_0=f(m, n, p)$, или, в конечном счете, $K_0=f'(\alpha)$, так как m, n, p — суть функции коэффициента теплоотдачи (α). В табл. 1 приведены значения K_0, m, d, n, p для расходов сжатого воздуха и промывочной жидкости (воды), имеющих место в реальном процессе алмазного бурения. Значения коэффициента α для каждого конкретного случая определялись по методике М. И. Михеева [4]. При этом температура циркулирующего в призабойной зоне агента

$$t_p=t_{ср}+t_r, \tag{17}$$

где $t_{ср}$ — средняя температура среды, °С; t_r — повышение температуры циркуляционного агента за счет трения о стенки каналов при больших скоростях движения, °С.

Таблица 1

Циркуляционный агент	Расход циркуляционного агента	α, *ккал/м²·ч·°С*	m, *1/м*	n, *1/м*	p, *1/м*	K_0, *ккал/ч·°С*
Сжатый воздух (t_0=30°С)	1,5 *м³/мин*	600	125	23	63	1,27
	3,5	1 200	177	32	98	1,82
	5,5	1 800	217	40	120	2,14
Вода (t_0=10°С)	10 *л/мин*	3 000	281	51	155	2,76
	30	15 400	628	116	350	6,14
	50	27 500	850	155	467	8,50

В свою очередь,

$$t_{ср}=\frac{t_1+t_0}{2}, \tag{18}$$

где t_0 — температура в ядре нисходящего потока, °С; t_1 — температура восходящего потока,

$$t_1=t_0+\frac{Q}{Gc_p}, \tag{19}$$

где G — весовой расход агента, *кг/ч*; c_p — удельная теплоемкость агента (для воздуха — при постоянном давлении), *ккал/кг·°С*.

На основании выражений (18) и (19) средняя температура

$$t_{ср}=t_0+\frac{Q}{2Gc_p}. \tag{20}$$

Повышение температуры за счет трения о стенки каналов при больших скоростях движения определяется по формуле

$$t_r = r\frac{Aw^2}{2gc_p}, \qquad (21)$$

где A—тепловой эквивалент работы ($A=\frac{1}{427}$ *ккал/кг·м*; w—средняя скорость движения, *м/сек*; r—безразмерный коэффициент восстановления температуры ($r=0{,}89$).

Таким образом, выражение для температуры циркулирующего в призабойной зоне агента принимает вид

$$t_p = \frac{Q}{2Gc_p} + r\frac{Aw^2}{2gc_p} + t_0. \qquad (22)$$

Абсолютные значения членов, входящих в правую часть формулы (22), рассчитанные для различных значений расхода сжатого воздуха и воды, приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, температура сжатого воздуха в призабойной зоне повышается как за счет теплообменных процессов, так и за счет скоростного разогрева при трении о стенки каналов. Температура же воды в тех же условиях остается практически неизменной.

Таблица 2

Циркуляционный агент	Расход циркуляционного агента	$\frac{Q_{кр}}{2Gc_p}$, °С	$r\frac{Aw^2}{2gc_p}$, °С	t_p, °С	$t_a - t_p$, °С
Сжатый воздух ($t_0=30$°С)	1,5 *м³/мин*	15	~5	50	550
	3,5	10	~5	45	555
	5,5	5	~5	40	560
Вода ($t_0=10$°С)	10 *л/мин*	~1	—	11	589
	30	~0,5	—	10,5	589,5
	50	~0	—	10	590

Примечание. Предельно допустимая температура нагрева режущих граней алмазов $t_a=600$°С.

С учетом выражений (11) и (22) перепишем формулу для расчета нагрева режущих граней алмазов при бурении

$$t_a = \frac{Q\left[1 - \frac{f_a}{f_м}\cdot\frac{2p\frac{\lambda_к f_к}{\lambda_м f_м}\varphi + e^{nh}(2n-1) - e^{-nh}}{2p\frac{\lambda_к f_к}{\lambda_м f_м}\varphi + n(e^{nh} - e^{-nh})}\right]}{\lambda_a f_a m} + \frac{Q}{2Gc_p} + r\frac{Aw^2}{2gc_p} + t_0. \qquad (23)$$

С помощью формулы (23) определены температуры нагрева режущих граней алмазов для различных значений забойной мощности и разных видов циркуляционного агента—воды и сжатого воздуха. По результатам расчетов построены графики (рис. 2).

Как видно из этих графиков, критические значения мощности для различных видов и расхода циркуляционного агента оказываются весьма различными. Если при повышенных расходах воды (30—50 *л/мин*) перегрев алмазов не происходит даже при мощности до 5—7 *л. с.*, то при бурении с малыми расходами воды (10 *л/мин*) критическая мощность уже попадает в область практически достижимых значений

(2,6 *л. с*). В условиях бурения с продувкой сжатым воздухом критическое значение мощности еще более снижается, и при расходе воздуха в пределах 1,5—5,5 *м³/мин* оно составляет всего 1,1—1,9 *л. с.* Это обстоятельство должно обязательно учитываться при выборе технологии бурения с продувкой сжатым воздухом.

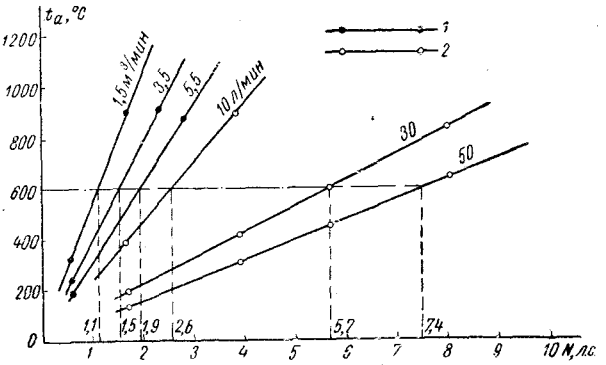


Рис. 2. Влияние забойной мощности и вида циркуляционного агента на нагрев алмазов при бурении
1—продувка воздухом; *2*—промывка водой

Влияние технологических факторов на нагрев алмазов можно проследить следующим образом. Представим мощность, реализуемую коронкой на забое скважины, в виде

$$N=N_i Z, \tag{24}$$

где N_i—мощность, отнесенная к одному работающему алмазу, *л. с.*; Z—количество работающих алмазов.

В условиях объемного разрушения породы нагрузку на единичный алмаз можно приближенно определить из известного уравнения Герца [5] для упругих контактов

$$P_y=1{,}29 d_a^2\left(\frac{1-\nu_a^2}{E_a}+\frac{1-\nu_п^2}{E_п}\right)^2 P^3_{тв},\ кГ, \tag{25}$$

где d_a—средний диаметр алмазного зерна, *мм*; $P_{тв}$—твердость горной породы, *кГ/мм²*; E_a и $E_п$—модули Юнга соответственно для алмаза и породы, *кГ/мм²*; ν_a и $\nu_п$—коэффициенты Пуассона соответственно для алмаза и породы $\nu_a=0{,}4\div0{,}45$, $\nu_п$ изменяется от 0—0,1 до 0,4, в среднем $\nu_п=0{,}25$ [5].

Окружное усилие, необходимое для движения алмаза по забою скважины, является функцией P_y и может быть найдено из выражения

$$P_x=\psi f P_y, \tag{26}$$

где f—коэффициент трения алмаза по породе ($f\approx0{,}45$); ψ—коэффициент, учитывающий изменение P_y при движении алмаза по забою ($\psi=0{,}20\div0{,}50$) [1].

Тогда

$$N_i=\frac{P_x \pi d_{эф} n_{вр}}{75\cdot60},\ л.\ с., \tag{27}$$

где $d_{эф}$—эффективный диаметр установки алмазного зерна в матрице коронки, *м*; $n_{вр}$—скорость вращения коронки, *об/мин*.

С учетом формул (26) и (27) выражение (24) можно переписать в виде

$$N=\frac{1{,}29d_{а}^{2}\left(\frac{1-\nu_{а}^{2}}{E_{а}}+\frac{1-\nu_{п}^{2}}{E_{п}}\right)^{2}P^{3}_{тв}\,\psi\, f\pi d_{эф}n_{вр}}{75\cdot 60}Z,\ л.\,с. \qquad (28)$$

Формула (28) наглядно показывает сильное влияние твердости породы на величину забойной мощности при объемном характере разрушения. Для того чтобы с увеличением твердости породы сохранить объемный характер ее разрушения и не превысить при этом критического значения мощности, необходимо уменьшить крупность алмазов в коронке или снизить скорость ее вращения.

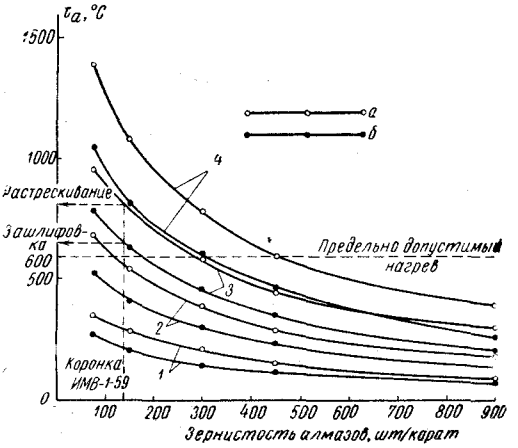


Рис. 3. Влияние физико-механических свойств пород и крупности алмазов на температуру их нагрева при бурении
а—бурение по гранитам; *б*—по диабазу.
Забойная мощность *N*, *л. с.*: *1*—0,5; *2*—1; *3*—1,5; *4*—2. Расход воздуха 3,5 *м*³/*мин*, температура 0° С

На рис. 3 представлено изменение нагрева режущих граней алмазов в зависимости от их крупности, величины забойной мощности и физико-механических свойств горных пород при бурении с продувкой воздухом. Как видно из графика, при бурении коронкой ИМВ-1-59 (зернистость алмазов 135 *шт/карат*) температура нагрева алмазов превышает допустимый предел уже при величине забойной мощности 1,5 *л. с.* Уменьшение крупности зерен до 300—400 *шт/карат* позволило бы при той же мощности обеспечить нормальный тепловой режим коронки.

В процессе экспериментального бурения замечено, что алмазы, перегреваясь, испытывают деформации в основном двух видов: зашлифование и растрескивание. Зашлифование наблюдалось на алмазах коронки ИМВ-1-59 при бурении по диабазу и частично по граниту. В коронках с более крупными алмазами (20—30 *шт/карат*—МВ-1 и 30—40 *шт/карат*—АК-3) во всех случаях (как при бурении по граниту, так и по диабазу) наблюдались преимущественно растрескивания и выпадения алмазов.

На рис. 4 показано изменение механической скорости при бурении по блоку диабаза. Анализ графиков рис. 4 показывает, что при

бурении алмазными коронками с продувкой существует критическая скорость вращения, достижение и превышение которой вызывает температурные деформации алмазов. Например, при бурении по диабаза

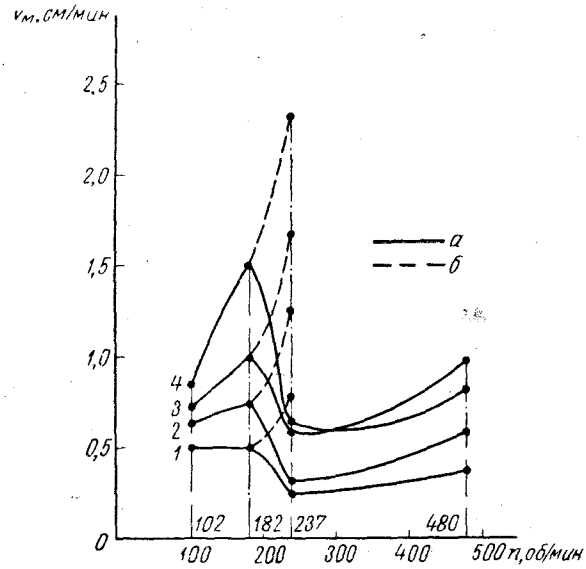


Рис. 4. Изменение механической скорости алмазного бурения с продувкой по блоку диабаза (расход воздуха 3,5 *м³/мин*, температура 0° С)

а—зашлифование алмазов; *б*—после снятия зашлифования. Осевая нагрузка *С*, *кГ*: *1*—400; *2*—600; *3*—800; *4*—1000

критическая скорость равна 182 *об/мин*. Во всех случаях бурения температурные деформации появлялись при примерно одинаковых значениях забойной мощности—1,4—1,6 *л. с.*

Выводы

1. Основными факторами, определяющими температурный режим алмазных коронок в процессе бурения, являются величина забойной мощности, интенсивность охлаждения коронки за счет теплообмена с циркулирующим в скважине агентом, его количество и температура. Для различных циркуляционных агентов в зависимости от их расходов существуют критические значения забойной мощности, превышение которых вызывает нарушение нормального температурного режима алмазных коронок. Вследствие этого резко снижается работоспособность коронок (зашлифование, растрескивание и выпадение алмазов, „прижоги" коронок и т. п.). В частности, при бурении с продувкой воздухом критическое значение забойной мощности для стандартных коронок не превышает 1,5—2,0 *л. с.*, что значительно ниже предельного уровня для бурения с промывкой.

2. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показали, что нагрев алмазов в коронке при постоянной забойной мощности сильно зависит от крупности алмазных зерен и твердости горных пород. С учетом крупности алмазов, используемых в настоящее время для армирования алмазных коронок, областью рациональ-

ного применения серийных коронок при бурении с продувкой воздухом следует считать проходку пород не выше X категории по буримости. При этом необходимо применение рационального режима бурения, при котором величина осевой нагрузки должна обеспечить объемное разрушение породы, а скорость вращения коронки — величину забойной мощности, близкую к критической.

Для эффективного бурения пород более высоких категорий с продувкой воздухом необходимы специальные коронки, отличающиеся меньшей крупностью алмазов и более совершенной конструкцией, и искусственное охлаждение сжатого воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков Л. К. Исследование и нормализация теплового режима алмазных коронок при бурении с продувкой воздухом. Автореф. канд. дисс. МВ и ССО РСФСР, ЛГИ. Л., 1968.
2. Кудряшов Б. Б., Михайлова Н. Д. Влияние промывочной среды на охлаждение буровых коронок при вращательном бурении. Изв. вузов, Горн. журн. № 11, 1964.
3. Лукаш В. А. и др. Исследование термостойкости природных алмазов. В сб. «Алмазн. и твердоспл. инструмент в горн. деле». Киев, «Техніка», 1965.
4. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1965.
5. Остроушко И. А. Забойные процессы и инструменты при бурении горных пород. Госгортехиздат, 1962.
6. Шамшев Ф. А. и др. Технология и техника разведочного бурения. Недра, 1966.
7. Шафрановский И. И. Алмазы. Наука, 1964.
8. Шрейнер Л. А. и др. Механические и абразивные свойства горных пород. Гостоптехиздат, 1958.