Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
том LXXXVI, 1981 г.

УДК 622.233.43

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ОЧИСТНЫМИ АГЕНТАМИ

Л.К.ГОРШКОВ, А.М.ЯКОВЛЕВ

Прогнозирование механической скорости бурения как одной из потенциальных возможностей алмазного породоразрушающего инструмента, обусловленных конструктивными особенностями инструмента, характеристиками очистного агента, буримых пород и технологией бурения, является основой для применения методов оптимизации процессов алмазного бурения. При этом величину механической скорости бурения целесообразно прогнозировать с учетом температурного фактора, оказывающего отрицательное корректирующее действие на механизм разрушения буримой породы [2], что вызывает необходимость определения предельно допустимой величины забойной мощности

$$N_{ПР} = \frac{t_a - t_o}{k_н} K_o \cdot 10^{-3}, \qquad (1)$$

где t_a - предельно допустимая температура нагрева режущих граней буровых алмазов (по данным В.А.Лукаша, С.П.Савченко, А.З.Московчука [9], t_a = = 600 °С); t_o - температура очистного агента, °С; $k_н$ - коэффициент нагрева коронки, характеризующий распределение теплового потока, генерируемого на забое, в буримую породу и тело коронки (по данным Б.Б.Кудряшова и Н.Д.Михайловой [8], $k_н$ = 0,87÷0,93); K_o - коэффициент интенсивности теплообмена, определяющий количество тепловой энергии, отводимой от коронки при ее охлаждении на 1 °С, Вт/град (K_o определяется по аналитическому выражению [3] и зависит от геометрии коронки, теплофизических свойств материалов матрицы, корпуса коронки, зернистости и концентрации алмазов, вида и расхода очистного агента.

Величина забойной мощности связана с режимными параметрами следующей зависимостью [13]:

$$N_{ПР} = 2 \cdot 10^{-5} D_{СР}\, C\, n_{ВР}, \qquad (2)$$

где $D_{СР}$ - средний диаметр коронки, м; C - осевая нагрузка на коронку, Н; $n_{ВР}$ - предельно допустимая частота вращения бурового снаряда, об/мин.

Вычислив $N_{ПР}$ по уравнению (I) и использовав выражение (2), можно определить величину предельно допустимой частоты вращения снаряда:

$$n_{ВР} = \frac{16 K_0 (t_a - t_0)}{k_н D_{СР}\, C}. \qquad (3)$$

С учетом выражения (3) прогнозное значение предельной механической скорости бурения можно представить следующим образом:

$$V_{м.п} = \frac{60 \eta\, w\, Z_К n_{ВР}}{F_Б}, \qquad (4)$$

где w - объем борозды разрушения, производимого при движении одного алмаза по забою; $Z_К$ - число алмазов по торцу коронки на линии резания; $F_Б$ - площадь борозды разрушения в проекции на забой скважины; η - коэффициент, учитывающий колебания механической скорости бурения при изменении условий очистки, связанных с природой очистного агента, режимом его течения и буримостью горной породы (табл.I).

Таблица 1

Коэффициент η для различных видов очистного агента

Очистной агент	Категории пород по буримости			
	У1-УII	УIII-1Х	IX-X1	X1-XII
Сжатый воздух (для сухого разреза)	7	6	3	1
Вода	1	1	1	1
Глинистый раствор	0,5	0,6	0,7	0,8

Примечание. Режим течения очистного агента определяется критерием Рейнольдса [13]: для воздуха - Re = 14150; для воды - 3948; для глинистого раствора - 436 (для коронки диаметром 59 мм).

Объем борозды разрушения w можно определить как произведение площади сегмента (поперечного сечения борозды) на длину окружности с введением коэффициента φ_0, учитывающего изменение площади контактирования алмаза с породой за счет трещиноватости, шерохсватости, сколов породы. Количественно величина φ_0 определяется отношением контактной твердости $P_К$ к твердости породы по штампу $P_{ТВ}$. Согласно полученным ранее данным [IO] $\varphi_0 = 0,17 \div 0,25$.

Таким образом,

$$w = \frac{2}{3} \varphi_0 d_К \Delta \pi D_{СР}, \qquad (5)$$

где d_K – диаметр площадки контактирования алмаза диаметром D_a с забоем, м; по данным исследований [2], $d_K = 2\sqrt{D_a \Delta}$ (Δ – глубина внедрения алмаза в породу забоя, м).

Глубина внедрения алмазов в породу – величина, постоянная для конкретной пары коронка–порода [I]:

$$\Delta \geqslant 0{,}5 r_K , \qquad (6)$$

где r_K – радиус вершины алмазного зерна в месте контактирования с забоем, м.

Для практических расчетов принимают Δ = I÷I0 % от выпуска алмазов h_a из матрицы [I4]: нижний предел – для наиболее твердых пород (XI–XII категорий), верхний – для слабых пород (УI–УII категорий), в среднем можно принять Δ = 5 % от h_a. Если учесть, что $h_a \approx 0{,}2 D_a$ [II], то средняя величина Δ = I % от D_a.

Число алмазов на окружности по торцу коронки

$$Z_K = \frac{Z_T D_a}{b} , \qquad (7)$$

где Z_T – общее число алмазов на торце; b – ширина торца алмазной коронки, м.

Площадь борозды в проекции на забой скважины

$$F_Б = d_K \pi D_{CP} = 2\sqrt{D_a \Delta}\ \pi D_{CP} . \qquad (8)$$

Осевую нагрузку C , входящую в формулу (3), представим в виде

$$C = \varphi_0 p_{TB} f_a , \qquad (9)$$

где f_a – суммарная площадь контактов алмазов с забоем, $f_a = D_a \Delta Z_T$, м^2.

Тогда, раскрыв значения всех входящих в формулу (4) членов, после соответствующих преобразований получим

$$V_{м.п} = \frac{640 \gamma \eta K_0 (t_a - t_0)}{b k_H \pi D_{CP} p_{TB}} , \qquad (I0)$$

где γ – коэффициент, введение которого гарантирует непревышение предельно допустимой температуры нагрева алмазов при внезапных прекращениях циркуляции очистного агента (по опытным данным [3], для воды γ = 0,75÷0,85; для воздуха γ = I).

Как следует из формулы (I0), предельно возможная механическая скорость алмазного бурения зависит от геометрических параметров коронки (b и D_{CP}), твердости по штампу горной породы p_{TB} и коэффициента интенсивности теплообмена K_0 (величину разности $t_a - t_0$ можно принять за константу). Уменьшение ширины торца и диаметра коронки при неизменных параметрах очистного агента, концентрации и зернистости объемных алмазов, т.е. при неизменном K_0 , способствует увеличению механической скорости алмазного бурения. В свою очередь, увеличение K_0, т.е. применение высокотеплоемких очистных агентов при достаточном их расходе, повышение концентрации (массы) объемных алмазов при уменьшении их линейных размеров

обеспечит возрастание механической скорости алмазного бурения в условиях гарантированного нормального теплового режима работы алмазных коронок.

Формула (10) показывает, кроме того, что прогнозная величина механической скорости алмазного бурения, при которой обеспечиваются и нормальные тепловые условия работы буровых алмазов, прямо не зависит от режимных параметров (осевой нагрузки и частоты вращения). Непосредственное влияние на $V_{м.п}$ оказывают конструктивные характеристики коронки (b, $D_{ср}$, K_0), режим промывки и твердость буримых пород $p_{тв}$.

Влияние режимных параметров в формуле (10) косвенно проявляется через коэффициент K_0, так как он определяет величину забойной мощности, которая, в свою очередь, реализуется на забое скважины через осевую нагрузку и частоту вращения (см.формулу (2)). Кроме того, K_0 есть функция глубины внедрения и площади контактирования объемных алмазов с забоем скважины, а эти величины зависят как от размера объемных алмазов, их массового содержания в коронке, так и от осевой нагрузки и твердости буримой породы.

Прогнозная величина механической скорости алмазного бурения, рассчитанная по формуле (10), есть величина постоянная и служит для оперативной оценки качества отработки алмазной коронки и процесса бурения в целом. Очевидно, что текущее значение механической скорости алмазного бурения $V_м$, определяемое соотношением режимных параметров и твердости по штампу буримой породы, должно удовлетворять следующему условию:

$$V_м = \frac{12{,}8 \cdot 10^{-2} \gamma \eta c n_{вр}}{b \pi p_{тв}} \leqslant \frac{640 \gamma \eta K_0 (t_0 - t_0)}{b k_н \pi D_{ср} p_{тв}} = V_{м.п.} \qquad (11)$$

В качестве примера приведем расчет прогнозных величин механической скорости бурения алмазными коронками разных типов в породах различной буримости с применением в качестве очистных агентов воды и сжатого воздуха (табл.2). Температура воды t_0 = 10 °С, сжатого воздуха t_0 = 20 °С. Для сравнения в табл.2 приведены значения механической скорости бурения алмазными коронками, полученные в производственных условиях при близких к расчетным значениях режимных параметров.

Как следует из приведенного расчета (табл.2), прогнозные значения механической скорости удовлетворительно коррелируют с опытными данными, что свидетельствует о практической применимости предложенного алгоритма прогнозирования. Кроме того, анализ расчетных данных показывает эффективность использования низкотеплоемких очистных агентов (в данном случае, сжатого воздуха) в породах УI-IX (реже X) категорий по буримости, где результаты бурения конкурируют, а иногда и превосходят показатели бурения с промывкой, что подтверждается производственными данными. Прогнозные расчеты намечают и пути совершенствования алмазного инструмента с целью повышения механической скорости. В частности, повышение концентрации объемных алмазов при значительном уменьшении их линейных размеров (например, при использовании коронок типа ИМВ-4, ИМВ-5 и подобных им) может способствовать улучшению технико-экономических показателей алмазного бурения, например, значительному росту механической скорости бурения.

Таблица 2

Расчет величин прогнозируемой механической скорости бурения серийными алмазными коронками

Тип коронки	Зернистость объемных алмазов, шт./карат	Масса объемных алмазов, карат	Категория пород по буримости (средняя твердость по штампу, $Н/м^2$)	Вид очистного агента	Расход очистного агента (вода, л/мин; воздух, $м^3$/мин)	K_0, Вт/°С	Забойная мощность, кВт	Прогнозируемая величина механической скорости бурения, м/ч	Реальная механическая скорость бурения (по опытным данным), м/ч
04А3	10–20	10,4[x] / 12,0	У1–УП1 ($225 \cdot 10^7$)	Вода	30	39,14[x] / 29,56	25,66[x] / 23,62	4,34[x] / 2,34	1,28–4,55 [7]
					50	49,95 / 40,46	32,75 / 26,53	5,52 / 3,19	
					70	59,18 / 47,21	38,79 / 31,0	6,52 / 3,72	
				Воздух	3,0	5,30 / 5,40	3,36 / 3,42	5,03 / 3,65	
					4,5	6,25 / 6,38	3,96 / 4,04	5,95 / 4,34	2,4–4,5 [4, 6]
					6,0	7,03 / 7,27	4,45 / 4,61	6,73 / 4,47	
05А3	20–30	6,0 / 8,0	УШ–1Х ($400 \cdot 10^7$)	Вода	30	23,75 / 28,44	15,57 / 18,64	1,47 / 1,26	0,83–2,04 [7]
					50	29,68 / 31,80	19,46 / 20,85	1,85 / 1,41	
06А3	20–30	6,0 / 8,0	УШ–1Х ($400 \cdot 10^7$)	Вода	70	34,53 / 36,87	22,64 / 24,17	2,14 / 1,64	1,5–1,8 [4]
				Воздух	3,0	3,41 / 4,38	2,16 / 2,77	1,56 / 1,44	
					4,5	4,02 / 5,17	2,54 / 3,28	1,86 / 1,68	
					6,0	4,51 / 5,89	2,86 / 3,73	2,04 / 1,92	
01А4 01А3	40–50	3,9 / 5,0	УШ–1Х ($400 \cdot 10^7$)	Вода	30	17,46 / 20,21	11,45 / 13,25	1,08 / 0,90	0,72–1,84 [7]
					50	21,63 / 22,60	14,18 / 14,80	1,34 / 1,01	
					70	24,98 / 26,10	16,38 / 17,07	1,55 / 1,16	
				Воздух	3,0	2,58 / 2,62	1,63 / 1,66	1,19 / 0,84	1,2–1,3 [4]
					4,5	3,03 / 3,09	1,92 / 1,96	1,38 / 1,02	
					6,0	3,40 / 3,52	2,16 / 2,23	1,56 / 1,14	

[x] В числителе приведены значения для коронок диаметром 59 мм, в знаменателе – 76 мм.

Продолжение табл. 2

Тип коронки	Зернистость объемных алмазов, шт./карат	Масса объемных алмазов, карат	Категория пород по буримости (средняя твердость по штампу, $Н/м^2$)	Вид очистного агента	Расход очистного агента (вода, л/мин; воздух, $м^3$/мин)	K_0, Вт/°С	Забойная мощность, кВт	Прогнозируемая величина механической скорости бурения, м/ч	Реальная механическая скорость бурения (по опытным данным), м/ч
02И3 02И4 03И5	120–150	8,8 12,0 (4 условных слоя)	IX–X1 ($7 \cdot 10^7$)	Вода	30	10,05 12,77	6,59 8,37	0,46 0,41	0,5–0,6 [7]
					50	12,36 14,20	8,10 9,31	0,56 0,46	
					70	14,20 16,32	9,31 10,70	0,64 0,53	
				Воздух	3,0	1,51 2,04	0,96 1,29	0,25 0,24	0,18–0,30 [5]
					4,5	1,78 2,41	1,13 1,53	0,29 0,29	
					6,0	2,0 2,74	1,27 1,74	0,33 0,33	
02И3 02И4 03И5	150–400	8,8 12,0 (5 условных слоев)	IX–X1 ($7 \cdot 10^7$)	Вода	30	16,51 20,79	10,82 13,63	0,75 0,67	0,55–1,14 [7]
					50	20,33 23,13	13,33 15,16	0,92 0,75	
					70	23,36 26,60	15,31 17,44	1,05 0,86	
				Воздух	3,0	2,48 3,32	1,57 2,10	0,41 0,40	0,30–0,36 [5]
					4,5	2,92 3,92	1,85 2,48	0,49 0,47	
					6,0	3,27 4,46	2,07 2,82	0,55 0,53	
02И3 02И4 03И5	150–400	8,8 12,0 (5 условных слоев)	X1–XII ($7 \cdot 10^7$)	Вода	30	16,51 20,79	10,82 13,63	0,59 0,53	0,55–0,70 [12]
					50	20,33 23,13	13,33 15,16	0,72 0,59	
					70	23,36 26,60	15,31 17,74	0,83 0,68	
				Воздух	3,0	2,48 3,32	1,57 2,10	0,21 0,10	–
					4,5	2,92 3,92	1,85 2,48	0,13 0,12	
					6,0	3,27 4,46	2,07 2,82	0,14 0,14	

Окончание табл. 2

Тип коронки	Зеркистость объемных алмазов, шт./карат	Масса объемных алмазов, карат	Категория пород по буримости (средняя твердость по штампу, $Н/м^2$)	Вид очистного агента	Расход очистного агента (вода, л/мин; воздух, $м^3$/мин)	K_0 Вт/°С	Забойная мощность, кВт	Прогнозируемая величина механической скорости бурения, м/ч	Реальная механическая скорость бурения (по опытным данным), м/ч
ИМВ-4	400-800	16,0 24,0 (6 условных слоев)	XI-XII ($700 \cdot 10^7$)	Вода	30	40,69 56,90	26,68 37,30	1,45 1,44	–
					50	50,21 63,36	32,92 11,53	1,78 1,61	
					70	57,81 72,98	37,90 47,84	2,05 1,85	
				Воздух	3,0	6,07 9,01	3,85 5,71	0,27 0,29	–
					4,5	7,15 10,65	4,53 6,74	0,31 0,33	
					6,0	8,02 12,12	5,08 7,67	0,35 0,38	
ИМВ-5	800-1200	24,0 36,0 (7 условных слоев)	XI-XII ($700 \cdot 10^7$)	Вода	30	59,57 83,25	39,05 54,57	2,12 2,11	–
					50	73,52 92,70	48,19 60,77	2,61 2,35	
					70	84,64 106,79	55,49 70,01	3,01 2,71	
				Воздух	3,0	8,89 13,18	5,63 8,35	0,39 0,41	–
					4,5	10,46 15,57	6,62 9,86	0,46 0,49	
					6,0	11,74 17,72	7,43 11,22	0,51 0,55	

Таким образом, можно полагать, что прогнозирование в алмазном бурении при условии учета действия температурного фактора способствует правильному выбору технологических параметров, объективному контролю за процессом бурения, выбору очистного агента, выбору наиболее отвечающей условиям работы конструкции алмазной коронки и может наметить реальный путь совершенствования породоразрушающего инструмента с целью его более эффективного использования в конкретных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володченко В.К. Исследование и разработка технологии бурения алмазными коронками, импрегнированными природным сырьем зернистостью до 15 тыс.шт./карат. Автореф.канд. дисс., М., МГРИ, 1980.

2. Горшков Л.К. Температурный фактор и прогнозирование в алмазном бурении. – В кн.: Технология и техника геологоразведочных работ. М., МГРИ, 1979, № 3.

3. Горшков Л.К. Температурный фактор в алмазном бурении. Моногр., депонир. ВИНИТИ, № 1580–77 Деп. РЖ „Горное дело", 1977, № 7.

4. Горшков Л.К. Оценка целесообразности применения продувки при алмазном бурении серийными коронками. – Колыма, 1975, № 10.

5. Горшков Л.К., Платонов А.Ф. Некоторые вопросы выбора размеров буровых алмазов и проектирование технологических режимов при алмазном бурении скважин с продувкой воздухом. – Тр. Гидропроекта. Ленинградский вып., Л., Энергия, 1972, № 27 (14).

6. Касаточкин А.В., Кудряшов Б.Б., Горшков Л.К. Некоторые вопросы конструирования алмазных коронок для бурения с продувкой воздухом. – Тр. ЦНИГРИ. М., 1970, вып. 90.

7. Корнилов Н.И., Блинов Г.А., Курочкин П.Н. Технология бурения скважин алмазным инструментом при высоких скоростях вращения. М., Недра, 1978.

8. Кудряшов Б.Б., Михайлова Н.Д. Влияние промывочной среды на охлаждение буровых коронок при вращательном бурении. – Изв. вузов. Горный журнал, 1964, № 1.

9. Лукаш В.А., Савченко С.П., Московчук А.З. Исследование термостойкости природных алмазов. – В кн.: Алмазный и твердосплавный инструмент в горном деле. Киев, Техника, 1965 .

10. Породоразрушающий инструмент для геологоразведочных скважин / Н.И.Корнилов, В.С.Травкин, Л.К.Берестень и др. М., Недра, 1979.

11. Справочник по алмазному бурению геологоразведочных скважин / Под ред. Г.А.Блинова. Л., Недра, 1975.

12. Совершенствование бурения геологоразведочных скважин / А.А.Питаде, В.А.Ярошенко, А.Н.Борькин и др. М., Недра, 1970.

13. Технология и техника разведочного бурения / Ф.А.Шамшев, С.Н.Тараканов, Б.Б.Кудряшов и др. М., Недра, 1973.

14. Ermacov Al. Forajul cu diamante. Bucureşti. Ed. Tehnică, 1973.