

О ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ БУРЕНИЯ ШПУРОВ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ ОТ УСИЛИЯ ПОДАЧИ

О. Д. АЛИМОВ, Л. Т. ДВОРНИКОВ

В работе [1] нами показано, что между скоростью вращательного бурения шпуров и усилием подачи существует зависимость

$$V = \kappa (P_{\text{п}} - P_0), \quad (1)$$

где V — скорость бурения, мм/мин;

κ — коэффициент эффективности вращательного бурения,
мм/кг · мин;

$P_{\text{п}}$ — усилие подачи на шпинделе бурильной машины, кг;

P_0 — усилие подачи, соответствующее началу объемного разрушения горной породы, кг.

Выявление коэффициентов κ и P_0 производилось нами путем обобщения экспериментальных данных многих исследователей.

Зависимость коэффициента κ от коэффициента крепости горных пород по шкале проф. М. М. Протодяконова приведена на рис. 1. Зависимость построена по 11 точкам, каждая из которых получена путем обработки экспериментальной зависимости $V = f(P_{\text{п}})$, полученной тем или иным исследователем при бурении той или иной горной породы.

Величина κ определялась из зависимости

$$\kappa = \frac{V}{P_{\text{п}} - P_0}.$$

Так как зависимости $V = f(P)$ в каждом конкретном случае не были строго линейными, то для различных значений V (V_1, V_2, \dots, V_n) и соответствующих им $P_{\text{п}}$ ($P_{\text{п}1}, P_{\text{п}2}, \dots, P_{\text{п}n}$) могли появляться значения ($\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n$).

Наиболее вероятным действительным значением κ является среднее арифметическое $\bar{\kappa}$ всех значений $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n$, так как все значения κ получены с одинаковой точностью (использование той же методики и измерительной аппаратуры).

Таким образом,

$$\bar{\kappa} = \frac{\sum \kappa}{n}.$$

Объективной характеристикой точности определения среднего арифметического значения служит средняя квадратическая ошибка

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\kappa} - \kappa_i)^2}{n-1}}, \quad (2)$$

где $(\bar{\kappa} - \kappa_i)$ — среднее отклонение одного измерения;
 n — число измерений.

Определенная по формуле (2) σ — есть средняя квадратическая ошибка одного измерения. Средняя квадратическая ошибка среднего арифметического

$$\sigma_{\bar{\kappa}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Таблица 1

Горная порода — среднезернистый песчаник с $f=8$ по данным Волкова А. Н. [2];
 оптимальная скорость вращения инструмента — 270 об/мин.

№ п. п.	Усилие подачи, кг	Скорость вращения, мм/мин	$P_n - P_0$, кг	κ	Отклонения $\varepsilon = \bar{\kappa} - \kappa_i$	ε^2
1	400	230	110	2,09		
2	550	400	260	1,54	+0,04	$16 \cdot 10^{-4}$
3	650	550	360	1,53	+0,05	$25 \cdot 10^{-4}$
4	750	700	460	1,52	+0,06	$36 \cdot 10^{-4}$
5	800	840	510	1,65	-0,07	$49 \cdot 10^{-4}$
6	900	1000	61	1,64	-0,06	$36 \cdot 10^{-4}$
7	1100	1330	810	1,64	-0,06	$36 \cdot 10^{-4}$
8	1300	1620	1010	1,60	-0,02	$4 \cdot 10^{-4}$
9	1450	1810	1160	1,56	+0,02	
$\Sigma \varepsilon = 0,38;$ $\eta = \pm 0,05$						$\Sigma \varepsilon^2 = 0,0206$
$\kappa = \frac{V}{P_n - P_0};$ $P_0 = 290 \text{ кг [2]}$				Первое значение κ (первая строчка) отбрасывается, как значительно отличающееся от всех других		
$\bar{\kappa} = \frac{\Sigma \kappa}{8} = \frac{12,68}{8} = 1,58 \text{ (5)}$				$\sigma = \pm \sqrt{\frac{0,0206}{7}} = \pm \frac{\sqrt{29,3}}{100} =$ $= \pm \frac{5,4}{100} = \pm 0,054,$ $\sigma_{\bar{\kappa}} = \pm \frac{0,054}{8} \pm \frac{0,054}{2,83} =$ $= \pm 0,019 \approx \pm 0,02$		

$$\kappa = (1,58 \pm 0,02); \quad W = \frac{0,02}{1,58} \cdot 100 = 1,3\%.$$

Действительное значение κ может быть определено как

или

$$\kappa = \bar{\kappa} \pm t \cdot \sigma_{\kappa}$$

$$\bar{\kappa} - t \sigma_{\kappa} < \kappa < \bar{\kappa} + t \cdot \sigma_{\kappa};$$

здесь t — коэффициент доверия, любое положительное число.

Используя правило «трех сигма», заключающееся в утверждении, что ошибка приближенного равенства

$$\kappa \approx \bar{\kappa}$$

не превосходит утроенной средней квадратической ошибки среднего $\bar{\kappa}$, можно записать

$$\bar{\kappa} - 3\sigma_{\kappa} < \kappa < \bar{\kappa} + 3\sigma_{\kappa}.$$

Для сравнительной оценки точности различных характеристик применяется так называемый коэффициент вариации, который определяется как отношение средней квадратической ошибки к среднему арифметическому значению величины. В рассматриваемом случае коэффициент вариации

$$W = \frac{\sigma_{\kappa}}{\bar{\kappa}} \cdot 100 \%.$$

Таблица 2

Горная порода и ссылка на литературу	Среднее арифметическое значение, $\bar{\kappa}$	Средняя квадратическая ошибка, σ_{κ}	Коэффициент вариации W , %
Уголь, $f = 2 \div 3$, [3] . . .	6,85	0,32	4,5
Песчаник мелкозернистый, $f = 4 \div 5$, [2]	3,70	0,15	4,0
Алевролит, $f = 5$, [2] . . .	3,14	0,24	7,6
Некрепкий песчаник, $f = 6$, [4]	2,17	0,10	4,6
Мрамор, $f = 6$, [5]	2,06	0,03	1,5
Известняк, $f = 6$, [6] . . .	1,92	0,06	3,1
Песчаник, $f = 6 \div 8$, [7] . .	1,67	0,09	5,4
Среднезернистый песчаник, $f = 8$, [2]	1,58	0,02	1,3
Известняк, $f = 10$, [8] . .	1,21	0,08	6,6
Доломитизированный известняк, $f = 12$, [8]	0,71	0,06	8,4
Грубозернистый кварцевый песчаник, $f = 14 \div 17$, [9]	0,20	0,02	10,0

В табл. 1 показан пример обработки зависимости $V = f(P_n)$ с целью определения κ , σ , σ_{κ} , W . Результаты обработки одиннадцати таких зависимостей с ссылкой на источники приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, коэффициент вариации не превышает 10%, что в горнотехнических расчетах может быть отнесено к классу «точных» [10].

Для изучения и описания зависимости κ от коэффициента крепости горных пород f наносим на график $\kappa = \varphi(f)$ точки согласно табл. 2 (рис. 1). Из графика видно, что зависимость $\kappa = \varphi(f)$ может быть раз-

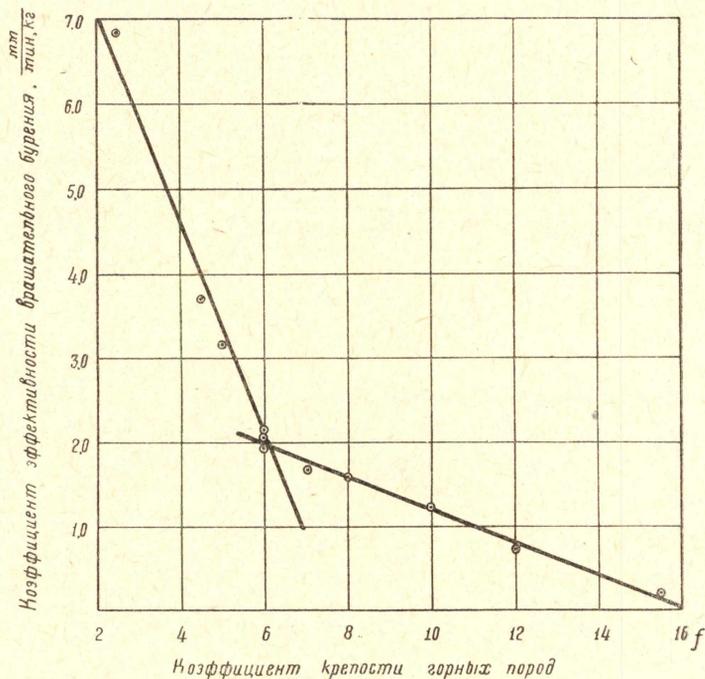


Рис. 1

делена на два участка: $\kappa = \varphi_1(f)$ при $f = 2 \div 6$ и $\kappa = \varphi_2(f)$ при $f \geq 6$. На обоих участках зависимости могут быть описаны прямыми линиями.

Воспользуемся методом наименьших квадратов для описания $\kappa = \varphi(f)$ по частям. Согласно этому методу лучшей кривой, описывающей зависимость, является

такая сумма квадратов отклонений точек, от которой наименьшая, т. е.

$$\sum \varepsilon^2 = \text{минимум.} \quad (3)$$

В диапазоне $f = 2 \div 6$ имеем ряд точек (табл. 3).

Опишем эту зависимость прямой, которая проходит возможно ближе ко всем точкам. Уравнение прямой запишем в виде:

$$\kappa = B_0 + B_1 f.$$

Подставляя в это уравнение значения κ и f из табл. 3, находим условные уравнения:

$$B_0 + 2,5 B_1 - 6,85 = \varepsilon_1,$$

$$B_0 + 4,5 B_1 - 3,70 = \varepsilon_2,$$

$$B_0 + 5B_1 - 3,14 = \varepsilon_3,$$

$$B_0 + 6B_1 - 2,17 = \varepsilon_4,$$

$$B_0 + 6B_1 - 2,06 = \varepsilon_5,$$

$$B_0 + 6B_1 - 1,92 = \varepsilon_6,$$

Согласно условию (3)

$$F = (B_0 + 2,5 B_1 - 6,85)^2 + (B_0 + 4,5 B_1 - 3,70)^2 + \\ + (B_0 + 5B_1 - 3,14)^2 + (B_0 + 6 B_1 - 2,17)^2 + (B_0 + 6 B_1 - 2,06)^2 + \\ + (B_0 + 6 B_1 - 1,92)^2 = \text{минимуму.} \quad (4)$$

Переменными являются B_0 и B_1 . Условие (4) будет соблюдено, если

частные производные $\frac{\partial F}{\partial B_0}$ и $\frac{\partial F}{\partial B_1}$ приравнять нулю:

$$\frac{\partial F}{\partial B_0} = 2(B_0 + 2,5 B_1 - 6,85) + 2(B_0 + 4,5 B_1 - 3,70) + \\ + 2(B_0 + 5 B_1 - 3,14) + 2(B_0 + 6 B_1 - 2,17) + 2(B_0 + 6 B_1 - 2,06) + \\ + 2(B_0 + 6 B_1 - 1,92) = 0.$$

$$\frac{\partial F}{\partial B_1} = 2(B_0 + 2,5 B_1 - 6,85) 2,5 + 2(B_0 + 4,5 B_1 - 3,70) 4,5 + \\ + 2(B_0 + 5 B_1 - 3,14) 5 + 2(B_0 + 6 B_1 - 2,17) 6 + 2(B_0 + 6 B_1 - \\ - 2,06) 6 + 2(B_0 + 6 B_1 - \\ - 1,92) 6 = 0.$$

Отсюда получим нормальные уравнения:

$$6 B_0 + 30 B_1 = 19,84,$$

$$30 B_0 + 159,5 B_1 = 86,375.$$

Нормальные уравнения сведем в табл. 4;

здесь M — свободный член;

S — сумма коэффициентов и свободных членов, определяется для контроля вычислений.

Третья строка записана для контроля.

Систему нормальных уравнений решаем с помощью определителей

$$D = \begin{vmatrix} 6 & 30 \\ 30 & 159,5 \end{vmatrix} = 57; \quad D_{B_0} = \begin{vmatrix} 19,84 & 30 \\ 86,375 & 159,5 \end{vmatrix} = 573,23;$$

$$D_\alpha = \begin{vmatrix} -16,16 & 30 \\ -103,125 & 159,5 \end{vmatrix} = 516,23; \quad D_{B_1} = \begin{vmatrix} 6 & 19,84 \\ 30 & 86,375 \end{vmatrix} = -76,95;$$

$$D_\beta = \begin{vmatrix} 6 & -16,16 \\ 30 & -103,125 \end{vmatrix} = -133,95.$$

Определители D_α и D_β получаются заменой столбца M на S , чтобы иметь контроль решения. α и β должны быть на единицу меньше B_0 и B_1 [11].

Т а б л и ц а 4

B_0	B_1	M	S
6	30	-19,84	16,16
30	159,5	-86,375	103,125
36	189,5	-106,215	119,285

$$B_0 = \frac{D_{B_0}}{D} = \frac{573,23}{57} = 10,06; \quad B_1 = \frac{D_{B_1}}{D} = -\frac{76,95}{57} = -1,35;$$

$$\alpha = \frac{D_\alpha}{D} = \frac{516,23}{57} = 9,06; \quad \beta = \frac{D_\beta}{D} = -\frac{133,95}{57} = -2,35.$$

Тогда $\kappa = 10,06 - 1,35 f$ (для $f = 2 \div 6$). Определяем среднеквадратическую ошибку полученного уравнения; для этого, используя коэффициенты B_0 и B_1 , найдем погрешности ε и их квадраты (табл. 5).

Таблица 5

$\kappa_{\text{табл}}$	$\kappa_{\text{расч}}$	ε	$\varepsilon^2 \cdot 10^{-4}$
6,85	6,69	-0,16	256
3,70	3,98	+0,28	784
3,14	3,31	+0,17	289
2,17	1,96	-0,21	441
2,06	1,96	-0,10	100
1,92	1,96	+0,04	16
ε		+0,02	0,1886

Средние квадратические отклонения неизвестных B_0 и B_1 нормальных уравнений определяются следующим образом [11]:

$$\sigma_{B_0}^2 = \frac{\sigma_0^2}{P_{B_0}} \quad \text{и} \quad \sigma_{B_1}^2 = \frac{\sigma_0^2}{P_{B_1}},$$

где σ_0 — наиболее вероятное значение средней квадратической ошибки на единицу веса;

P_{B_0} и P_{B_1} — веса неизвестных.

Величина

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum \varepsilon^2}{n - m};$$

здесь ε — отклонения (см. табл. 5),

n — число условных уравнений,

m — число неизвестных,

т. е.

$$\sigma_0^2 = \frac{0,1886}{6 - 2} = 0,047; \quad \sigma_0 = 0,217.$$

Веса неизвестных определяем с помощью определителей:

$$P_{B_0} = \frac{D}{D_{11}}, \quad P_{B_1} = \frac{D}{D_{22}},$$

где D_{11} и D_{22} — алгебраические дополнения первого и второго элементов главной диагонали определителя системы нормальных уравнений.

Таким образом,

$$P_{B_0} = \frac{57}{159,5} = 0,358; \quad P_{B_1} = \frac{57}{6} = 9,5;$$

тогда средние квадратические отклонения неизвестных:

$$\sigma_{B_0}^2 = \frac{0,047}{0,358} = 0,131; \quad \sigma_{B_1}^2 = \frac{0,047}{9,5} = 0,0045;$$

$$\sigma_{B_0} = 0,36; \quad \sigma_{B_1} = 0,067;$$

или

$$B_0 = 10,06 \pm 0,36; \quad B_1 = -1,35 \pm 0,067.$$

Округляем $B_0 = 10,0 \pm 0,4$; $B_1 = -1,35 \pm 0,07$.

Итак, уравнение прямой $\kappa = \varphi_1(f)$ в диапазоне $f = 2 \div 6$ получит вид:

$$\kappa = 10 - 1,35 f. \quad (5)$$

В диапазоне $f \geq 6$ для f и k имеем (табл. 6).
 Производим аналогичные расчеты и получаем

Таблица 6

f	6	6	6	7	8	10	12	15 5
k	2,17	2,06	1,92	1,67	1,58	1,21	0,71	0,20

$$6B'_0 + 58,5B'_1 = 7,42,$$

$$58,5B'_0 + 633,2B'_1 = 60,35.$$

Решая уравнения с помощью определителей, получаем:

$$D = 376,95; D_{B'_0} = 1167,869; D_{B'_1} = -71,97;$$

$$D_\alpha = 790,919; D_\beta = -448,92,$$

откуда $B'_0 = 3,098; \alpha = 2,098.$

$$B'_1 = -0,1909; \beta = -1,1909.$$

Значит, $\kappa = 3,098 - 0,1909f.$

Составляем табл. 7.

Из табл. 7

$$\sigma_0^2 = \frac{0,0284}{4} = 0,0071, \sigma_0 = 0,084.$$

Веса неизвестных:

$$P_{B'_0} = \frac{376,95}{633,20} = 0,595;$$

$$P_{B'_1} = \frac{376,95}{6} = 62,825.$$

Таблица 7

$\kappa_{\text{табл.}}$	$\kappa_{\text{расч.}}$	ϵ	$\epsilon^2 \cdot 10^{-4}$
2,05	1,96	-0,09	81
1,67	1,76	+0,09	81
1,58	1,57	-0,01	1
1,21	1,19	-0,02	4
0,71	0,80	+0,09	81
0,20	0,14	-0,06	36
Σ		0,00	0,0284

Средние квадратические отклонения неизвестных

$$\sigma_{B'_0}^2 = \frac{0,0071}{0,595} = 0,119; \sigma_{B'_1}^2 = \frac{0,0071}{62,825} = 0,00011.$$

$$\sigma_{B'_0} = 0,11;$$

$$\sigma_{B'_1} = 0,01.$$

Тогда $B'_0 = 3,098 \pm 0,11; B'_1 = -0,1909 \pm 0,01.$

Учитывая $\sigma_{B'_0}$ и $\sigma_{B'_1}$, запишем

$$B'_0 = 3,1 \pm 0,1; B'_1 = -0,19 \pm 0,01.$$

Уравнение $\kappa = \varphi_2(f)$ при $f \geq 6$ получит вид:

$$3,1 - 0,19f = \kappa. \quad (6)$$

Нами рекомендовано минимальное необходимое усилие подачи, соответствующее началу объемного разрушения горных пород при вращательном бурении, определять по формуле

$$P_0 = L \cdot f;$$

здесь L — коэффициент пропорциональности. Для резцов 42 мм L может быть принят равным 35 [1].

В табл. 8 представлены результаты обработки экспериментальных данных P_0 для различных горных пород.

Таблица 8

f	P_0 эксперимент.	L_i	ϵ	$\epsilon^2 \cdot 10^{-2}$
4 [12]	140	35	+4,8	2304
4 [2]	60	15	-15,2	23104
5 [2]	100	20	-10,2	10404
6 [4]	100	17	-13,2	17424
6 [13]	250	42	+11,8	13924
6 [6]	200	33	+2,8	784
6 [14]	250	41,5	+11,3	12769
7 [15]	90	14	-16,2	26244
8 [6]	250	31	+0,8	64
8 [2]	290	36	+5,8	3364
10 [8]	400	40	+9,8	9604
12 [8]	400	34	+3,8	1444
12 [16]	400	34	+3,8	1444
$\bar{L} = \frac{392,5}{13} = 30,2$	$\Sigma L = 392,5$		$\epsilon = -0,01$	$122877 \cdot 10^{-2}$
	$\sigma = \frac{1228,8}{12} = 10,1$			
	$\sigma_{\bar{L}} = \frac{10,1}{13} = 0,78 \quad 0,8.$			

$$L = 30,2 \pm 0,8; \quad W = 3 \%$$

Итак, на основании имеющихся экспериментальных данных, коэффициент, связывающий P_0 и f , заключен в диапазоне $27,8 < L < 32,6$, откуда видно, что коэффициент 35, принятый нами в [1], достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Вывод

Расчет режимов вращательного бурения шпуров может производиться по формуле

$$V = \kappa (P_{\Pi} - P_0).$$

Коэффициент эффективности бурения

$$\kappa = 3,1 - 0,19f \quad (\text{для пород с } f \geq 6)$$

и $\kappa = 10 - 1,35f$ (для пород с $f = 2-6$).

Величина $P_0 = 35f$.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Д. Алимов, Л. Т. Дворников. Бурение шпуров вращательным способом. Известия ТПИ, том 129, 1965.
2. А. Н. Волков. Исследования в области создания высокопроизводительных электросверл по породе. Сб. «Исследования по вопросам механизации горных работ и автоматике», КузНИИУИ, № 6, Госгортехиздат, 1959.

3. П. Н. Июдин. Применение электросверл для бурения шпуров по породам. ЦИТИУглестрой, Углетехиздат, 1957.

4. А. Д. Имас. Работы по внедрению рациональных технологических режимов разрушения углей и боковых пород горными машинами. Сб. «Разрушение углей и пород», Углетехиздат, 1958.

5. О. Д. Алимов, Н. С. Колодяжный, В. Н. Карминский. О создании длинноходовых электросверл с механической подачей. Изв. вузов «Горный журнал», № 2, 1963.

6. Г. Н. Покровский. Основные закономерности при вращательном бурении шпуров с постоянным усилием подачи. Труды ЗСФ АН СССР, вып. 19, 1957.

7. Н. С. Колодяжный, Л. Т. Дворников. Результаты лабораторных исследований длинноходового электросверла ЭДП-20. Известия ТПИ, том 123, Киев, 1963.

8. И. Е. Рудаковский. Некоторые итоги исследования электровращательного способа бурения шпуров. Изв. вузов. «Горный журнал», № 4, 1959.

9. М. К. Цехин. К вопросу установления оптимальных режимов электровращательного бурения шпуров в породах Прокопьевского месторождения. Известия ТПИ, том 93, 1958.

10. Л. И. Барон. О точности основных технологических показателей и инженерных расчетов процессов добычи руд. Известия АН СССР, отделение технических наук, № 9, 1951.

11. Б. М. Шиголов. Математическая обработка наблюдений. Изд. физ. мат. литературы, М., 1962.

12. А. Д. Имас, В. Л. Азарх. Определение режимов бурения горных пород. ЦИТИ, Углетехиздат, 1952.

13. А. А. Волков. Исследование электропривода колонковых электросверл. Кандидатская диссертация, Харьков, 1955.

14. И. Ф. Медведев, М. Н. Смолянинов, В. И. Тюрин. Электросверла с гидравлической подачей ЭСП-4. Сб. «Новое оборудование для бурения шпуров и скважин». ЦИТИУгля, 1960.

15. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, В. Ф. Горбунов, Д. Н. Маликов. Бурильные машины. Госгортехиздат, 1960.

16. Л. Г. Родик, Ю. Н. Смирнов, М. И. Голушков. Результаты экспериментальных работ по электровращательному бурению шпуров и скважин на рудниках Хайдаркана. Материалы I координ. совещания по электровращательному бурению шпуров, г. Фрунзе, 1964.
