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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОМ БУРЕНИИ

Ю. М. Парийский

Интенсивность разрушения горных пород при вращательно-ударном бурении зависит, как известно, от целого ряда факторов, важнейшими из которых являются энергия и частота ударов, величина осевой нагрузки и скорость вращения инструмента. Совместное действие этих факторов обусловливает весьма сложный характер процесса бурения, что сильно затрудняет исследование его закономерностей. Недостаточная изученность механизма разрушения горных пород и процесса взаимодействия инструмента с породой при вращательно-ударном бурении сдерживает развитие этого эффективного способа бурения.

Первоочередной задачей в решении этой проблемы является определение зависимости начальной механической скорости от параметров режима бурения как сложной функции совместно действующих факторов. Такая постановка задачи требует дополнительного экспериментального исследования изменения скорости бурения при различных сочетаниях режимных параметров. С этой целью нами была выполнена серия опытов на буровом стенде, созданном на основе вращательно-ударной буровой машины типа РПД-1 фирмы Джой, предназначенной для бурения шпуров в подземных горных выработках*.

Шпуры бурились в блоке базальта, механические свойства которого характеризуются следующими данными:

Прочность на сжатие, $кГ/см^2$	3000
Прочность на растяжение, $кГ/см^2$	153
Твердость по склероскопу Шора	79
Статический модуль упругости, $кГ/см^2$	$0{,}874 \cdot 10^6$
Динамический модуль упругости, $кГ/см^2$	$0{,}836 \cdot 10^6$

В качестве породоразрушающего инструмента использовались крестовые коронки для вращательно-ударного бурения, армированные

* Работа выполнена в период научной стажировки автора в Миннесотском университете США под руководством докторов В. Лакабана и Ч. Файерхорста и при участии Ш. Олтмана.

пластинками из твердого сплава. Диаметр коронок 42 *мм*. Шпуры промывались водой, подаваемой в количестве, обеспечивающем быстрое удаление породной мелочи. При обнаружении износа уголков лезвий коронка заменялась новой.

При планировании экспериментов в качестве независимых переменных были выбраны энергия единичного удара E, усилие подачи P и количество ударов на один оборот коронки $K=\frac{f}{n}$ или расстояние между двумя последовательными ударами, определяемое как $l=\frac{\pi D}{K}$, где D—внешний диаметр коронки.

Энергия и частота ударов измерялись с помощью проволочных датчиков сопротивления, наклеенных на буровой штанге, сигналы которых подавались на вход катодного двухлучевого осциллографа и фотографировались с помощью скоростной кинокамеры барабанного типа. Для тарирования датчиков, измеряющих энергию удара, применялся простой и весьма эффективный метод, разработанный в Миннесотском университете Ч. Файерхорстом. Буровая штанга с наклеенными датчиками сопротивления сбрасывалась с определенной высоты на поверхность блока горной породы. Возникающие в штанге при ее ударе о блок импульсы напряжений фотографировались с экрана осциллографа. Датчики располагались так, чтобы избежать наложения падающих и отраженных ударных волн. При этом максимальная амплитуда импульса соответствует действительному максимуму напряжений, который имеет место в момент, когда скорость соударения становится равной нулю. В этом случае величина напряжения определяется из выражения [3]

$$\sigma=\frac{E_0 v}{c},$$

где $v=\sqrt{2gH}$—скорость свободного падения штанги в момент удара, *м/сек*; H—высота сбрасывания штанги, *м*; g—ускорение свободного падения, *м/сек*^{2}; E_0—модуль упругости стали, *кГ/см*^{2}; c—скорость распространения ударных волн, *м/сек*, определяемая по осциллограмме.

Масштаб напряжений определялся сопоставлением величин напряжения и электрического импульса на осциллограмме. Величина энергии удара подсчитывалась по формуле [3]

$$E=\frac{Act\sigma^2_{ср}}{E_0},$$

где A—площадь поперечного сечения штанги, *см*^{2}; t—длительность ударного импульса, определяемая по осциллограмме, *сек*; $\sigma_{ср}$—среднее напряжение импульса, *кГ/см*^{2}.

Количество ударов на один оборот коронки измерялось с помощью электронного счетчика импульсов, на вход которого подавались сигналы частоты ударов от осциллографа, а сигналы числа оборотов—от магнитоэлектрического датчика, установленного на буровой штанге.

Машина РПД-1 оборудована цепным механизмом подачи с приводом от пневматического двигателя. Усилие подачи измерялось по давлению воздуха в питающей двигатель магистрали, которое было тарировано с помощью емкостного датчика, установленного на машине.

Задаваемые значения независимых переменных указаны в табл. 1. Отличительной особенностью принятой методики исследования являлось планирование экспериментов на основе латинского квадрата, т. е.

проведение опытов сериями, в которых все переменные, кроме одной, усреднялись в своем влиянии на конечный результат [1, 2]. С этой целью объекты эксперимента (различные сочетания переменных) были распределены в таблице экспериментов таким образом, чтобы каждое сочетание переменных встречалось только один раз в каждой строке и в каждом столбце.

Таблица 1

Значения независимых переменных

Переменные	Индексы				
	1	2	3	4	5
E, *кГ·см*	144	233	275	336	476
P, *кГ*	280	420	560	700	840
$K=\frac{f}{n}$, удар/об.	6	10	14	18	25
или					
$l=\frac{\pi D}{K}$, *см*	2,20	1,32	0,95	0,73	0,53

Скорость бурения определялась по графику проходка—время, получаемому с помощью самопишущего прибора, регистрирующего перемещение каретки буровой машины в функции времени.

Значения механической скорости бурения, полученные в результате опытов при различных значениях переменных, указаны в табл. 2 и представляют собой средние из 3—5 измерений.

Таблица 2

Значения v, *см/мин*

Индексы значений P	Индексы значений E				
	1	2	3	4	5
1	13,8 (1)	37,2 (3)	21,2 (2)	42 (5)	62,5 (4)
2	18,2 (3)	29,8 (2)	38,4 (4)	52,5 (1)	56,7 (5)
3	22,0 (4)	40,2 (5)	42,5 (3)	49,2 (2)	79,3 (1)
4	26,8 (5)	41,4 (4)	58,6 (1)	59,0 (3)	61,5 (2)
5	29,1 (2)	57,5 (1)	56,8 (5)	61,2 (4)	97,5 (3)

Примечание. В скобках рядом со значениями скорости бурения указаны индексы значений, l.

При анализе результатов опытов в качестве основной характеристики процесса была использована вместо скорости бурения безразмерная величина $y=\frac{v}{fl}$, где v—механическая скорость бурения, *см/мин*; f—частота ударов в минуту; l—расстояние между ударами, *см*. Значения y и $\frac{1}{v}$ приведены в табл. 3 и 4*.

* Применение безразмерной величины y вместо v позволяет получить искомые зависимости в более простом виде.

Анализируя данные табл. 3 и 4, легко заметить, что средние по строкам значения $\bar{y}_j$ из табл. 3 отличаются по характеру изменения от значений $\bar{y}_i$ из табл. 4. То же относится и к средним по столбцам значениям $\frac{1}{y_j}$. Это объясняется тем, что при суммировании $\frac{1}{y}$ по строкам табл. 4 влияние переменной E усредняется, а при таком же суммировании в табл. 3, очевидно, нет. Аналогично суммирование по столбцам устраняет влияние P только в табл. 3, в то время как в табл. 4 оно приводит к увеличению разброса значений $\frac{1}{y}$. Таким образом, можно заключить, что средние по столбцам табл. 3 представляют значения y при средних значениях параметров P и l, а значения y, обратные средним по строкам табл. 4, являются значениями y при средних значениях E и l.

Таблица 3

Значения y 10^{-2}

Индексы значений P	Индексы значений E					Сумма	Среднее
	1	2	3	4			
1	0,24 (1)	0,25 (3)	0,49 (2)	2,32 (5)	2,37 (4)	6,67	1,33
2	0,74 (3)	0,74 (2)	1,62 (4)	0,71 (1)	2,96 (5)	6,77	1,35
3	1,17 (4)	2,40 (5)	1,39 (3)	1,08 (2)	1,01 (1)	7,06	1,41
4	1,96 (5)	1,84 (4)	0,83 (1)	1,82 (3)	1,43 (2)	7,88	1,58
5	0,84 (2)	0,86 (1)	3,32 (5)	2,49 (4)	2,92 (3)	10,43	2,09
Сумма . . .	4,95	7,10	7,65	8,42	10,69	38,81	1,55
Среднее . . $\bar{y}_j$	0,99	1,42	1,53	1,68	2,14		
$1/\bar{y}_j$	100	70	65	59	47		

Таблица 4

Значения $\frac{1}{y}$

Индексы значений P	Индексы значений E					Среднее	$\bar{y}_i$ 10^{-2}
	1	2	3	4	5		
1	412 (1)	80 (3)	202 (2)	43 (5)	42 (4)	156	0,64
2	135 (3)	135 (2)	62 (4)	141 (1)	34 (5)	101	0,99
3	86 (4)	41 (5)	72 (3)	92 (2)	99 (1)	78	1,28
4	51 (5)	55 (4)	121 (1)	55 (3)	70 (2)	70	1,43
5	119 (2)	117 (1)	30 (5)	40 (4)	34 (3)	68	1,47
Сумма . . .	803	428	487	371	279		
$\left(\frac{1}{y}\right)_{ср}$	161	86	97	74	56		

Зависимость y от E при $P=\overline{P}$ и $l=\overline{l}$ по данным табл. 3 аппроксимируется функцией вида

$$\frac{1}{y}=\beta\left(\frac{1}{E}-\frac{\overline{1}}{E}\right)+\alpha, \qquad (1)$$

где $\frac{\overline{1}}{E}$ — среднее арифметическое значений $\frac{1}{E}$.

Зависимость y от P при $E=\overline{E}$ и $l=\overline{l}$ с учетом данных табл. 4 можно выразить функцией подобного типа

$$y=a-b\left(\frac{1}{P}-\frac{\overline{1}}{P}\right), \qquad (2)$$

где $\frac{\overline{1}}{P}$ — среднее арифметическое значений $\frac{1}{P}$.

С учетом характера усреднения величин y и $\frac{1}{y}$ зависимость y от совместного действия E и P следует представить в виде

$$y=\frac{1}{\beta\left(\frac{1}{E}-\frac{\overline{1}}{E}\right)+\alpha}-b\left(\frac{1}{P}-\frac{\overline{1}}{P}\right). \qquad (3)$$

Физически величина y представляет собой наклон винтовой линии, описываемой буровой коронкой при движении в процессе бурения.

Уравнение (3) связывает величину y со значениями энергии удара E, осевой нагрузки P, а также расстояния между ударами l, функциями которого являются коэффициенты α и β. Коэффициент b зависит от свойств породы и геометрии коронки, а не от значений других режимных параметров, поскольку их влияние уже учитывается соответствующими коэффициентами.

Подставив значения средних по строкам y_i из табл. 4 в уравнение (2), получим систему уравнений, из которой определим численные значения коэффициентов a и b,

$$y=1{,}16\cdot10^{-2}-3{,}85\left(\frac{1}{P}-2{,}07\cdot10^{-3}\right). \qquad (4)$$

Таблица 5

$$y-y_{\Delta P}=y_{\overline{P}}\ 10^{-2}$$

Индексы значений l	Индексы значений E					Сумма	Среднее
	1	2	3	4	5		
1	0,82	0,52	0,58	0,82	0,90	3,64	0,73
2	0,50	0,86	1,07	0,97	1,18	4,58	0,92
3	0,86	1,83	1,28	1,57	2,58	8,12	1,62
4	1,06	1,59	1,74	2,15	2,95	9,49	1,90
5	1,71	2,30	2,98	2,90	3,08	12,97	2,59
Сумма	4,95	7,10	7,65	8,41	10,69		
Среднее	0,99	1,42	1,53	1,68	2,14		

Второе слагаемое в выражении (4) характеризует влияние P на величину y. Вычитая это слагаемое из первоначальных значений y, получим зависимость y от E и l при $P=\overline{P}$ (табл. 5). Величины $\frac{1}{y_{\overline{P}}}$ приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения $\frac{1}{y_{\overline{P}}}$

Индексы значений l	Индексы значений E					Сумма	Среднее
	1	2	3	4	5		
1	122	192	173	122	111	720	144
2	200	116	93	103	85	597	119
3	116	55	78	64	39	352	70
4	94	63	57	46	34	294	59
5	58	43	34	34	32	201	40
Сумма	590	469	435	369	301		
Среднее	118	94	87	74	60		

Численные значения коэффициентов α и β в уравнении (1) для каждого значения l, определенные способом наименьших квадратов по данным табл. 6, указаны в табл. 7.

Таблица 7

Значения α и β

Индексы значений l	α	$\beta\,10^3$	$\alpha_{\overline{P}}$	$\beta_{\overline{P}}\,10^3$
1	178	43,3	181	43,4
2	119	24,7	108	24,1
3	70	15,9	76	15,9
4	59	12,1	58	11,2
5	40	5,7	41	6,8

Так как α и β являются линейными функциями l, с помощью способа наименьших квадратов определим коэффициенты в уравнениях связывающих α, β и l,

$$\alpha=83{,}7\,l-3; \tag{5}$$

$$\beta=(22l-4{,}86)\cdot 10^3. \tag{6}$$

Рассчитанные по формулам (5) и (6) значения α и β приведены в табл. 7. Подставив значения α и β из уравнений (5) и (6) в формулу (3), после некоторых преобразований получим

$$y=\frac{1}{\frac{(22l-4{,}86)\cdot 10^3}{E}+4{,}1\,(4-l)}+\frac{0{,}8\cdot 10^{-2}(P-480)}{P}. \tag{7}$$

Рассчитанные по формуле (7) значения y приведены в табл. 8. Сопоставление расчетных и фактических значений табл. 3 и 8 показывает их хорошую сходимость.

Таблица 8

Расчетные значения y

Индексы значений P	Индексы значений E					Сумма	Среднее
	1	2	3	4	5		
1	— (1)	0,65 (3)	0,43 (2)	2,37 (5)	2,22 (4)	5,67	1,42
2	0,69 (3)	0,76 (2)	1,73 (4)	0,61 (1)	3,45 (5)	7,24	1,45
3	1,21 (4)	2,43 (5)	1,54 (3)	1,31 (2)	1,12 (1)	7,61	1,52
4	1,89 (5)	1,89 (4)	0,85 (1)	1,92 (3)	1,89 (2)	8,44	1,69
5	0,90 (2)	0,86 (1)	2,90 (5)	2,47 (4)	2,51 (3)	9,64	1,93
Сумма	4,69	6,59	7,45	8,68	11,19	38,60	1,54
Среднее	1,17	1,32	1,49	1,74	2,24		

Чтобы проанализировать полученный результат, представим зависимости скорости бурения от каждого из режимных параметров в отдельности

$$v=\frac{\alpha_2 E+\beta_2}{\alpha_1 E+\beta_1}; \tag{8}$$

$$v=a_1-\frac{b_1}{P}; \tag{9}$$

$$v=\frac{fl}{Bl+C}+f\gamma l, \tag{10}$$

где

$$\beta_1=(22l-4{,}86)\cdot 10^3; \quad \alpha_1=4{,}1\,(4-l);$$

$$\alpha_2=(1+\alpha_1\gamma)fl; \quad \beta_2=\beta_1\gamma fl;$$

$$\gamma=\frac{0{,}8\cdot 10^{-2}\,(P-480)}{P};$$

$$a_1=\left[\frac{1}{\frac{\beta_1}{E}+\alpha_1}+0{,}8\cdot 10^{-2}\right]fl; \quad b_1=3{,}85fl;$$

$$B=\frac{22\cdot 10^3-4{,}1E}{E}; \quad C=\frac{16{,}4E-4{,}86\cdot 10^3}{E}.$$

Полученные выражения представляют собой уравнения гипербол с различными асимптотами. Так, зависимость (8) выражается гиперболой с горизонтальной асимптотой

$$v=\frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

и вертикальной

$$E=-\frac{\beta_1}{\alpha_1}.$$

Поведение функции зависит от знака определителя

$$D=\begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_1 & b_1 \end{vmatrix}.$$

В рассматриваемом случае $D>0$ и зависимость скорости бурения от энергии удара представляется ветвью гиперболы, возрастающей с увеличением E до предельного значения, определяемого положением горизонтальной асимптоты (рис. 1). Как видно из рис. 1, при малой величине осевой нагрузки ($\gamma<0$) кривая $v=f(E)$ пересекает ось абсцисс в некоторой точке $E=E_{\min}$, которая соответствует минимально необходимому для разрушения породы значению энергии единичного удара (порог энергии). С уменьшением расстояния между ударами значение порога энергии удара уменьшается, так же как и предельное значение скорости бурения. При значительной нагрузке ($\gamma>0$) кривые $v=f(E)$ вообще не пересекают ось абсцисс, а увеличение расстояния между ударами приводит к смещению горизонтальных асимптот в область более высоких скоростей бурения.

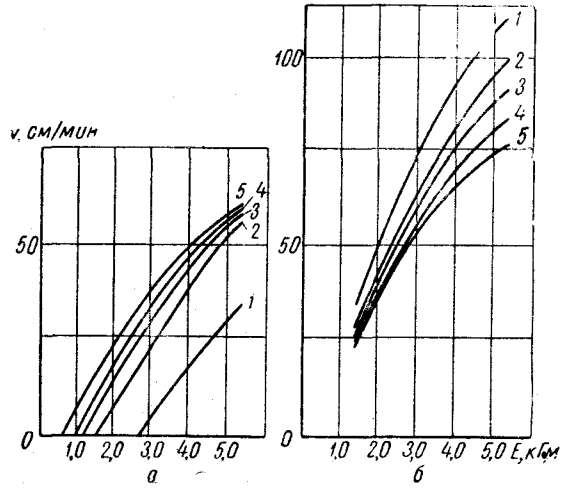


Рис. 1. Зависимость механической скорости бурения от энергии удара: *а*—P=280 *кг*; *б*—P=840 *кг*.
Расстояния между ударами *l*, *см*: *1*—2,20; *2*—1,32; *3*—0,95; *4*—0,73; *5*—0,53

Зависимость скорости бурения от величины осевой нагрузки показана на рис. 2, из которого видно, что с увеличением нагрузки значение скорости бурения растет, асимптотически приближаясь к предельной величине, зависящей от энергии ударов и расстояния между ними. При любой энергии удара, однако, существует определенное значение осевой нагрузки, минимально необходимое для разрушения породы,

$$P_{\min}=\frac{b_1}{a_1}. \qquad (11)$$

Большой интерес представляет определение зависимости скорости бурения от расстояния между ударами. Как видно из формулы (10), эта зависимость выражается кривой гиперболического типа с асимптотами

$$l=-\frac{C}{B} \quad \text{и} \quad v=\gamma fl+\frac{f}{B} \quad \text{(рис. 3)}.$$

В зависимости от соотношения между энергией удара и величиной осевой нагрузки скорость бурения с увеличением l может изменяться весьма различным образом. Поведение функции зависит от знаков коэффициентов C и γ, которые определяются значениями энергии удара и осевой нагрузки. При $C<0$ и $\gamma<0$ функция монотонно убывает, а при $C>0$ и $\gamma>0$ монотонно возрастает. При различных знаках C

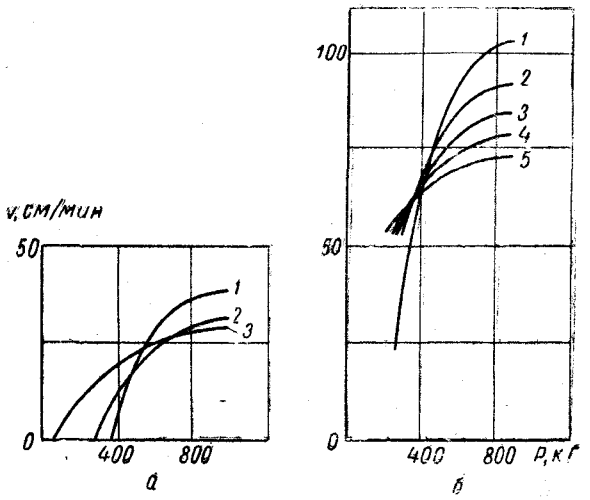


Рис. 2. Зависимость механической скорости бурения от осевой нагрузки при $E=1{,}44$ $кГ\cdot м$ (*а*) и $4{,}76$ $кГ\cdot м$ (*б*). Обозначения см. на рис. 1.

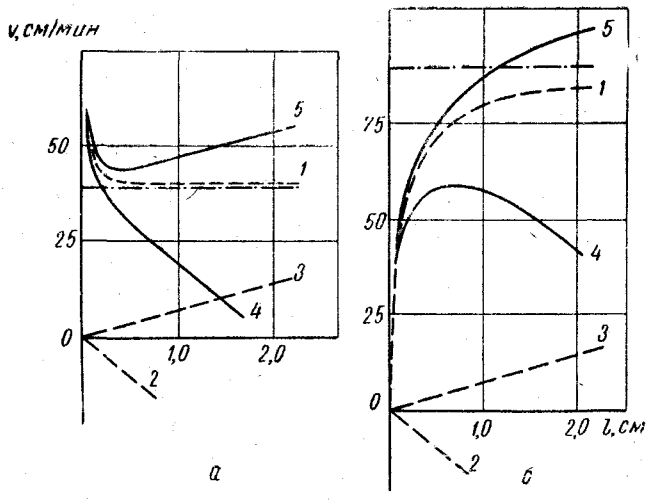


Рис. 3. Зависимость механической скорости бурения от расстояния между ударами

а—$E=2{,}75$ $кГ\cdot м$ ($C<0$); *б*—$E=4{,}76$ $кГ\cdot м$ ($C>0$)

1—кривая $v_1=\frac{fl}{Bl+C}$; *2*—прямая $v_2=-f\gamma_1 l$ ($P=280$ $кГ$); *3*—прямая $v_2=f\gamma_2 l$ ($P=840$ $кГ$); *4*, *5*—суммарные кривые $v=f(l)=v_1+v_2$

и γ функция имеет экстремумы: минимум при $C<0$ и максимум при $C>0$. Построение зависимости $v=f(l)$ производится алгебраическим суммированием ординат двух функций, входящих в правую часть уравнения (10) (см. рис. 3).

Зависимость скорости бурения от расстояния между ударами при различных значениях других параметров режима показана на рис. 4.

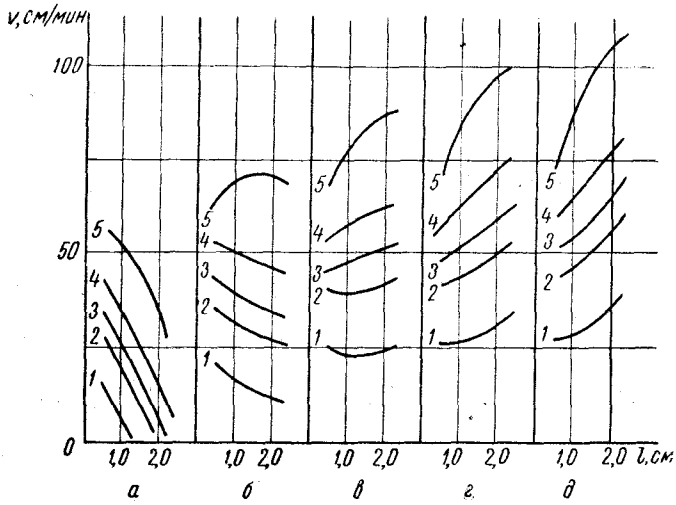


Рис. 4. Зависимость механической скорости бурения от расстояния между ударами при различных значениях режимных параметров

P, *кГ*: *а*—280; *б*—420; *в*—550; *г*—700; *д*—840; *E*, *кГ·м*: *1*—1,44; *2*—2,33; *3*—2,75; *4*—3,36; *5*—4,76

Выводы

1. Отличительной особенностью процесса разрушения горных пород при вращательно-ударном бурении является взаимодействие полей напряжений, создаваемых в массиве пород смежными ударами инструмента. В зависимости от расстояния между ударами, энергии удара и осевой нагрузки это взаимодействие обусловливает сложный и многообразный характер изменения скорости бурения.

При величине энергии удара ниже некоторого критического для данной пары инструмент—порода значения взаимодействие полей динамических напряжений имеет место при небольших расстояниях между ударами. Разрушение породы при этом имеет, по-видимому, усталостный характер, и его интенсивность увеличивается с уменьшением расстояния между ударами.

Изменение скорости бурения при дальнейшем увеличении расстояния между ударами зависит от величины осевой нагрузки: при малых нагрузках скорость уменьшается, при нагрузке выше некоторого значения—увеличивается.

Если энергия удара превосходит критическое значение, взаимодействие полей динамических напряжений распространяется на более значительное расстояние вследствие изменения характера разрушения. Если при этом величина осевой нагрузки не превосходит некоторого

критического значения, скорость бурения имеет максимум при оптимальном расстоянии между ударами

$$l_{\text{опт}}=\frac{\sqrt{\frac{C}{\gamma}}-C}{B}.$$

При этом, вероятно, происходит слияние соседних лунок разрушения, образующихся при ударе, и процесс бурения характеризуется наименьшей для данных условий энергоемкостью. С увеличением энергии удара и осевой нагрузки оптимальное расстояние между ударами увеличивается. С увеличением осевой нагрузки выше критического значения скорость бурения с увеличением расстояния между ударами возрастает сначала весьма интенсивно, а затем приблизительно линейно.

2. Влиянием взаимодействия полей напряжений объясняется и характер зависимости скорости бурения от энергии удара. Заметный рост скорости бурения с увеличением энергии удара имеет место лишь до такого значения энергии, при котором наступает взаимодействие между полями напряжений для данного расстояния между ударами. Энергоемкость разрушения достигает минимального для данных условий значения, и дальнейшее увеличение скорости требует изменения режима бурения.

3. Заданные значения энергии удара и расстояния между ними определяют предельное значение скорости бурения как функции осевой нагрузки. С увеличением осевой нагрузки скорость бурения увеличивается, асимптотически приближаясь к пределу, обусловленному значениями двух других параметров режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Протодьяконов М. М. Рациональная методика планирования экспериментов. Изд. ИГД им. А. Скочинского, М., 1961.

2. Хальд А. Математическая статистика с техническими применениями. ИЛ, 1956.

3. Fairhurst C. Wave mechanics of percussive drilling. Min. a. quarry engng., 3, 4. 1961.