Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XXXVI, вып. 1, 1958 г.

О РЕЗЕРВАХ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СТАНКОВ УДАРНОКАНАТНОГО БУРЕНИЯ

В. О. МАЛЬЧЕНОК

До сих пор основным средством бурения скважин для взрывных работ на открытых разработках являются ударноканатные станки. На рудниках и карьерах работает более 1500 станков, общий объем бурения которыми превышает 3 млн. *пог. м* скважин в год.

Повышению производительности станков и совершенствованию буровых работ в последние годы уделялось много внимания, однако производительность бурения растет все же крайне медленно. На рудниках с хорошей организацией буровых работ, где простои станков сведены к минимуму, производительность бурения в последние годы практически не увеличивается, т. е. резервы повышения производительности за счет организационных мероприятий в значительной мере использованы. Для дальнейшего повышения производительности необходимо модернизировать станки.

Модернизации должна предшествовать работа по обобщению опыта эксплуатации станков на различных рудниках Советского Союза, изысканию резервов дальнейшего повышения производительности и выявлению возможностей их конструктивного улучшения. Этим вопросам посвящен ряд работ [1, 2, 3].

Так, например, найденные О. И. Алексеевым [1] качественные и количественные зависимости могут быть использованы при модернизации станков. Но в общем эти работы носят частный характер, вопрос повышения производительности рассматривается в них некомплексно, не дается зависимости, устанавливающей связь между основными параметрами, характеризующими работу станка. Поэтому эти исследования не дают возможности проведения детального анализа работы бурового снаряда в скважине.

Использовать для анализа существующие аналитические зависимости определения скорости v и ускорения j, установленные Б. И. Воздвиженским и Н. И. Куличихиным [2], также не представляется возможным. Хотя условия работы снаряда в скважине трактуются правильно, формулы, составленные для средних условий, не могут быть применены даже для приблизительной оценки влияния на скорость и ускорение падающего в скважине снаряда таких факторов, как плотность, уровень шлама в скважине, относительный диаметр снаряда и т. д.

Попытки использовать с этой же целью аналитические зависимости для определения скорости и ускорения, предложенные П. П. Назаровым [3], не дали положительных результатов. Как показала проверка, рас-

хождение вычисленных по основной формуле П. П. Назарова значений ускорений с данными опыта достигает 36% (табл. 1).

Таблица 1

высота падения, м	Ускорение падения снаряда в скважине (м/сек²) при $h = 4$ м и плотности γ (кг/дм³), равной											
	1,20			1,60			2,0			2,3		
	по формуле П. П. Назарова	из опыта	расхождение, %	по формуле П. П. Назарова	из опыта	расхождение, %	по формуле П. П. Назарова	из опыта	расхождение, %	по формуле П. П. Назарова	из опыта	расхождение, %
0,6	7,03	8,21	16,8	6,13	7,11	16,0	5,30	7,01	33,2	4,61	6,2	36,6
0,8	6,96	7,65	9,9	6,04	7,10	17,5	5,21	6,67	28,0	4,51	6,0	33,0
1,0	6,89	7,45	8,2	5,95	6,68	12,3	5,11	6,12	19,8	4,41	5,78	31,0

Таким образом, необходимы формулы, более точно отражающие кинематику падающего в скважине снаряда, чтобы их было можно использовать для выявления резервов повышения производительности станков ударноканатного бурения.

Анализ работ, проведенных в этом направлении ранее, а также практика бурения скважин в крепких породах показали, что при прочих равных условиях производительность станка ударноканатного бурения будет тем выше, чем большее количество энергии буровой снаряд может отдать забою скважин в единицу времени. Выявлению условий, в наибольшей мере способствующих этому, и были подчинены все исследования. Особое внимание уделялось детальному изучению кинематики падающего в скважине бурового снаряда с определением количественных соотношений между высотой подъема, ускорением, скоростью и временем падения снаряда.

Экспериментальные работы были поставлены на открытых рудниках Норильского комбината. Исследования проводились на буровых станках типа БС-1. Для фиксирования движения бурового снаряда применялась киносъемка. Приведенные в работе выводы сделаны на основе обработки 10 000 кинокадров.

Уравнение движения бурового снаряда в скважине может быть представлено в следующем виде:

$$m\frac{d^2H}{dt^2} = P - \left[\gamma V_0 + wS\gamma H + z\left(\frac{dH}{dt}\right)^x + wm_1\frac{d^2H}{dt^2}\right], \qquad (1)$$

где P — вес бурового снаряда, кг;

H — высота подъема снаряда, м;

γ — плотность шлама, кг/м³;

v_0 — объем вытесненного снарядом шлама при нахождении его в верхнем положении, м³;

S — поперечное сечение снаряда, м²;

z — коэффициент сопротивления движения снаряда, $\frac{кгсек^2}{м^2}$;

w — отношение сечения снаряда к площади кольцевого зазора между стенками скважины и телом снаряда;

m — масса снаряда, $\frac{кГ\,сек^2}{м}$;

m_1 — масса шлама, $\frac{кГ\,сек^2}{м}$.

В период падения снаряда, как следует из уравнения, сила, под действием которой движется снаряд, складывается из разницы между

весом снаряда и силами, противодействующими движению (выражение в скобках):

γV_0 — выражает потерю веса от погружения снаряда в шлам;

$S\gamma Hw$ — потерю веса от погружения снаряда в шлам на величину его хода;

$z\left(\frac{dH}{dt}\right)^x$ — скоростные сопротивления;

$w\frac{d^2H}{dt^2}m_1$ — сопротивления, связанные с инерцией шлама.

В выражении (1) не определен показатель степени при скорости $\frac{dH}{dt} - x$, показывающий характер зависимости скоростных сопротивлений от скорости движения снаряда и величины z. Обе задачи могут быть решены в результате совместной обработки зависимостей $S = \varphi(t)$; $v_{сн} = \varphi'(t)$ и $j = \varphi''(t)$, полученных опытом (рис. 1).

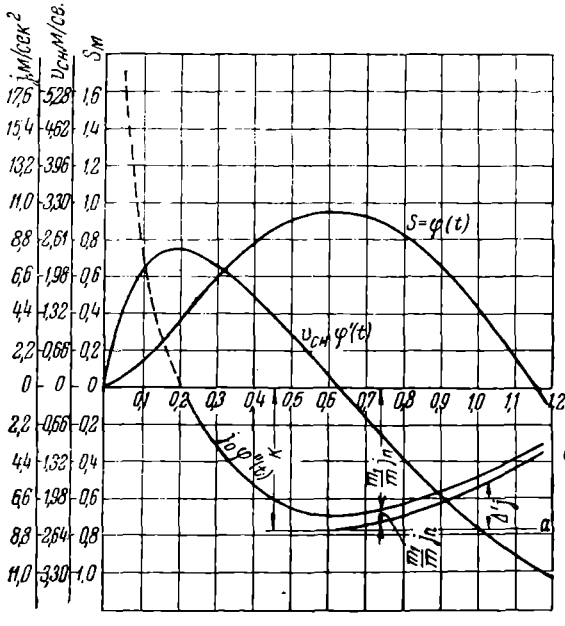


Рис. 1. Зависимость скорости V, ускорения j, пути S от времени при падении бурового снаряда в скважине

На рис. 1 приведено вспомогательное построение для определения потерь ускорения снаряда от действия скоростных сопротивлений. Ускорение, с которым двигался бы снаряд при отсутствии всех сопротивлений, кроме гидростатических, было бы постоянным и для любого момента времени равнялось K (прямая $а$). Кроме потери веса в шламе, движению снаряда противодействуют скоростные и инерционные сопротивления. Первые будут возрастать по мере увеличения скорости, вторые будут иметь наибольшее значение в начале падения при максимальной величине j и будут уменьшаться с течением времени.

Так как для любого момента времени ускорения определены из опыта, то легко подсчитать потерю ускорения вследствие инерционных сопротивлений и построить кривую $б$, характеризующую изменение ускорения при условии, что из сил сопротивления, кроме потери веса в шламе, действуют еще и инерционные силы. Отрезки ординат, заключенные между кривой $j = \varphi''(t)$ и кривой $б$, характеризуют зависимость изменения инерционных сил в шламе от времени. Отрезки ординат между кривыми $а$ и $б$ численно соответствуют уменьшению ускорения от действия на снаряд скоростных сопротивлений. Обозначая это замедление через Δj, величину его можно представить как отношение величины скоростных сопротивлений к массе снаряда, т. е.

$$\frac{zv_{сн}^x}{m} = \Delta j. \qquad (2)$$

Определение коэффициентов сопротивления и значений показателя степени x при скорости движения снаряда $v_{сн}$ выполнено методом наименьших квадратов. Высота падения снаряда разбивалась на 5 интервалов (0,2; 0,4;. 1,0 *м*), для каждого интервала составлялось уравнение для уклонений

$$\lg\left(\frac{z}{m}\right) + x \lg v_{сн} - \lg \Delta j = a.$$

Величины $v_{сн}$, m и Δj, входящие в эти уравнения, определялись опытом. Величина z нанесена на график рис. 2, *а*.

Численная величина x для различных уровней и плотностей шлама представлена в табл. 2, откуда видно, что скоростные сопротивления при падении снаряда в скважине пропорциональны квадрату скорости движения.

На основании графика *а* (рис. 2) построен график *б*, который используется для нахождения общего вида формулы при определении z. В качестве аргумента взят уровень шлама в скважине. Графики представляют собой прямые линии, уравнение которых имеет вид

$$z = b + \operatorname{tg} \alpha h. \qquad (3)$$

Как видно из рис. 2, *б*, значение b зависит от плотности шлама в скважине. Для установления характера этой зависимости построен график *в*. Он выражает зависимость b от γ и также представляет прямую линию, выраженную уравнением

$$b = a + (\gamma - 1) \operatorname{tg} \beta. \qquad (4)$$

В этом уравнении член соответствует лобовым

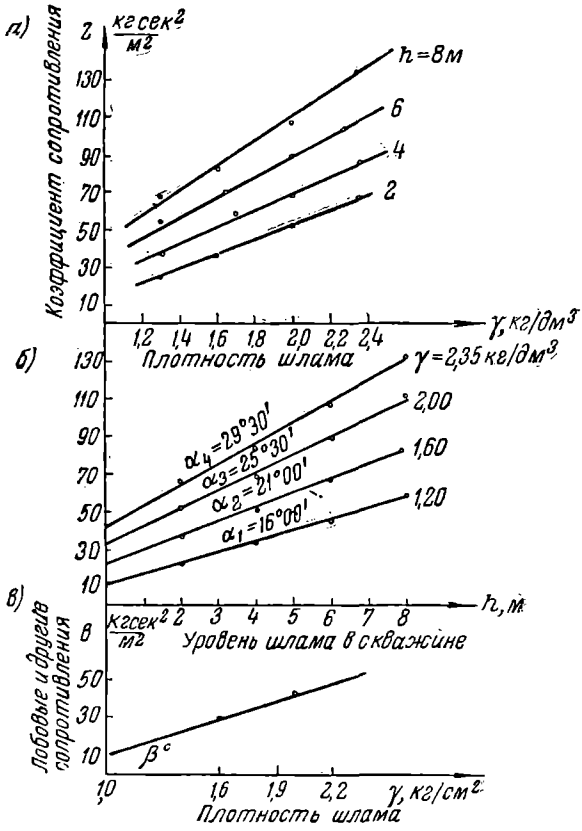


Рис. 2. Влияние уровня и плотности шлама на величину коэффициента сопротивления z:

а — зависимость от плотности шлама в скважине для различных уровней; *б* — зависимость коэффициента сопротивления от уровня шлама в скважине для различных плотностей; *в* — изменение лобовых и других сопротивлений, не зависящих от уровня шлама в скважине

Таблица 2

Уровень шлама в скважине, *м*	2				4				6				8			
Плотность шлама, *кг/см³*	1250	1600	2000	2350	1300	1700	2000	2350	1300	1650	2000	2300	2350	2000	1600	1300
x	1,90	2,10	2,10	1,97	2,03	1,95	2,0	2,0	1,94	1,96	1,96	2,06	2,1	2,0	—	1,97

сопротивлениям при плотности шлама в скважине, равной единице, т. е. при движении снаряда в воде.

Подставляя выражения (4) в (3), получим

$$z = a + (\gamma - 1)\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\alpha h. \tag{5}$$

Член $\operatorname{tg}\alpha h$ характеризует сопротивления, связанные с трением шлама о тело снаряда. Они аналогичны сопротивлениям, возникающим при движении пульпы в пульпопроводах и определяются через потерю напора

$$i = \frac{\gamma l}{RC^2} v_{\text{п}}^2, \tag{6}$$

где $v_{\text{п}}$ — скорость движения пульпы, *м/сек*;
γ — объемный вес пульпы, *т/м*^{3};
l — длина пульпопровода, *м*;
R — гидравлический радиус, *м*;
C — коэффициент, определяемый по полной формуле Н. Н. Павловского,

$$C = \frac{R^y}{n};$$

$$Y = 2{,}5\sqrt{5} - 0{,}13 - 0{,}75\left(\sqrt{n} - 0{,}10\right)\sqrt{R},$$

где n — коэффициент шероховатости.

В общем случае скорость перемещения уровня шлама в скважине отлична от скорости движения снаряда, причем для одного и того же момента времени шлам по отношению к стенке скважины и телу снаряда имеет различные скорости, соответственно равные $v_{\text{сн}}w$ и $v_{\text{сн}} + v_{\text{сн}}w$. Так как выше коэффициенты сопротивлений определены относительно скорости снаряда, то для того чтобы при определении можно было воспользоваться формулой (6), необходимо скорость движения шлама в скважине привести к скорости движения снаряда. Это можно сделать, определив соотношение между скоростью движения снаряда и средневзвешенной по периметрам и шероховатости скоростью движения шлама в кольцевом зазоре. Тогда

$$v_{\text{св}} = \eta v_{\text{сн}},$$

где $v_{\text{св}}$ — средневзвешенная по периметру и шероховатости скорость движения шлама, *м/сек*;
$v_{\text{сн}}$ — скорость движения снаряда, *м/сек*;
η — коэффициент приведения скорости снаряда к скорости движения шлама.

Для нашего случая формула (6) примет вид

$$i = \frac{\gamma\eta^2}{RC^2} h v_{\text{сп}}^2. \tag{7}$$

Если гидравлические сопротивления, возникающие при падении снаряда в скважине, аналогичны сопротивлению движения пульпы в пульпопроводах, то можно предположить, что в выражении (5)

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\gamma\eta^2}{RC^2} S 10^3, \tag{8}$$

где S — площадь сечения снаряда, *м*^{2};
10^3 — переводной коэффициент 1 *м вод. ст.*, *кг/м*^{2}.

Должно также выполняться соотношение

$$\operatorname{tg}\alpha_1 : \operatorname{tg}\alpha_2 : \operatorname{tg}\alpha_3 : \operatorname{tg}\alpha_4 = \gamma_1 : \gamma_2 : \gamma_3 \quad \gamma_4; \tag{9}$$

$$\gamma_1 : \gamma_2 \quad \gamma_3 : \gamma_4 = 1{,}000 : 1{,}337 \quad 1{,}661 \quad 1{,}971;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_1 : \operatorname{tg}\alpha_2 : \operatorname{tg}\alpha_3 : \operatorname{tg}\alpha_4 = 1{,}000 : 1{,}333 \quad 1{,}668 \quad 1{,}958.$$

Расчеты (табл. 3) подтверждают тождественность правой и левой частей равенства (8) и (9).* Некоторые отклонения лежат заведомо в пределах точности экспериментов и метода, принятого для обработки материалов киносъемки. Подставив в уравнение (5) значения $\operatorname{tg}\beta$ и α — равные соответственно 31 и 10 (рис. 2, *в*), получим

$$z = 10 + 31\,(\gamma - 1) + \frac{1000 S \eta^2}{RC^2}\,\gamma h \,\frac{кг \cdot сек^2}{м^2} \tag{10}$$

Таблица 3

Плотность шлама	$\frac{10^3\eta^2 S'}{RC^2}$	$\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\gamma}$	Отклонение, %
$\gamma_1 = 1{,}20$	4,76	4,79	0,7
$\gamma_2 = 1{,}60$	4,76	4,80	0,8
$\gamma_3 = 2{,}0$	4,76	4,77	0,2
$\gamma_4 = 2{,}35$	4,76	4,82	1,2

Формула (10) справедлива для условий бурения скважин долотом с проекцией лобовой части 280 *см*^{2}. Чтобы перейти к долотам с другой лобовой поверхностью S_x, необходимо выражение в скобках умножить на отношение $\frac{S_x}{280}$. Следовательно,

$$z = S_x(0{,}11\gamma - 0{,}075) + \frac{1000 S \eta^2}{RC^2}\,\gamma h. \tag{11}$$

Кроме того, формула (10) выведена на основе опытного бурения в породах с удельным весом 3, поэтому в виде (10) и (11) пригодна для определения коэффициента сопротивлений только в породах с удельным весом, отличным от 3 не более, чем на $\pm 10\%$.

При бурении в крепких породах можно считать, что гидравлические сопротивления зависят, в основном, от соотношения твердого и жидкого компонентов в единице объема шлама. Поэтому для определения коэффициента скоростных сопротивлений при любых удельных весах буримых пород следует пользоваться формулой

$$z = S_x(0{,}11\gamma - 0{,}075) + \frac{1000 S \eta^2}{RC^2}\,(2\rho - 1)\,h, \tag{12}$$

где ρ — количество твердого компонента в единице объема шлама.

Установив характер зависимости сопротивлений от скорости движения снаряда и определив значение коэффициента z, можно проинтегри-

* При подсчете, пользуясь рис. 2, *б*, левые части равенств необходимо для сохранения тождественности умножать на отношение масштабов $\frac{M_z}{M_h} = 0{,}01$.

ровать уравнение (1), в результате чего получим выражение для определения скорости падающего в скважине снаряда

$$v_{\text{сн}} = \sqrt{\frac{Q}{z}\left(1 - e^{-\frac{2z}{M}H}\right)}, \qquad (13)$$

где Q — вес снаряда в шламе;

$$Q = P - \gamma S\left(h_1 + \frac{Hw}{2}\right);$$

$$M = m + m_1 w;$$

h_1 — высота шлама в скважине при нахождении снаряда в верхнем положении.

По этой формуле можно вычислить скорость падения снаряда в зависимости от любого параметра, характеризующего буровой режим. Представление о степени согласования экспериментальных данных с данными, полученными расчетом по формуле (13), дает табл. 4.

Таблица 4

Плотность шлама, *кг/дм³*	Высота падения снаряда, *м*	Скорость падения снаряда в скважине (*м/сек*) при уровне шлама в скважине (*м*) равном							
		2		4		6		8	
		по формуле (13)	из опыта	по формуле (13)	из опыта	по формуле (13)	из опыта	по формуле (13)	из опыта
1,20 + 1,35	0,6	3,31	3,30	3,09	3,14	2,98	2,90	2,80	2,81
	0,8	3,74	3,76	3,49	3,50	3,37	3,30	3,15	3,13
	1,0	4,13	4,10	3,84	3,86	3,69	3,63	3,42	3,43
1,60 + 1,70	0,6	3,18	3,14	2,47	2,97	2,83	2,77	—	—
	0,8	3,60	3,56	3,34	2,73	3,17	3,17		—
	1,0	3,95	3,90	3,64	3,66	3,45	3,43	—	—
2,00 + 2,10	0,6	3,09	3,02	2,88	2,90	2,68	2,64	2,47	2,48
	0,8	3,48	3,40	3,22	3,27	2,98	3,04	2,73	2,74
	1,0	3,79	3,73	3,49	3,50	3,22	3,27	2,92	2,94
2,30 + 2,35	0,6	3,02	2,97	—	—	2,59	2,57	—	—
	0,8	3,37	3,35	3,13	3,14	2,86	2,85	2,57	2,51
	1,0	3,68	3,65	3,34	3,37	3,08	3,00	2,78	2,71

Примечание. Диаметры: скважины — 250 *мм*; ударной штанги — 180 *мм*; вес снаряда — 2000 *кг*.

Чтобы представить характер изменения скорости при падении снаряда с высоты большей, чем у обычных станков, производились специальные сбрасывания его в скважине, наполненной шламом с высоты до 2 *м*. Скорость падения при этом фиксировалась киносъемкой (табл. 5).

Для учета влияния количества шлама в скважине, его плотности, геометрических размеров инструмента и пройденного снарядом при падении пути на величину мгновенного ускорения предлагается пользоваться формулой, выведенной на основе уравнения движения (1). Представляя это уравнение в виде

$$jm = Q - zv_{\text{сн}}^2 - wm_1 j,$$

имеем

$$j = \frac{Q - zv_{\text{сн}}^2}{m + wm_1}$$

так.как

$$m + wm_1 = M$$

и

$$v_{\text{сн}}^2 = \frac{Q}{z}\left(1 - e^{-\frac{2z}{M}H}\right),$$

то

$$j = \frac{Q}{M} e^{-\frac{2z}{M}H} \tag{14}$$

Таблица 5

Высота падения снаряда H, *м*	Скорость падения снаряда в шламе (*м/сек*), при свободном сбрасывании h=5 *м* и плотности шлама (*кг/дм*³), равной					
	1,65		2,00		2,20	
	по формуле (13), *м/сек*	из опыта, *м/сек*	по формуле (13), *м/сек*	из опыта, *м/сек*	по формуле (13), *м/сек*	из опыта, *м/сек*
0,2	1,76	1,75	1,75	1,68	1,68	1,70
0,4	2,42	2,28	2,39	2,22	2,30	2,40
0,6	2,89	2,70	2,83	2,71	2,71	2,70
0,8	3,24	3,13	3,22	2,96	3,01	3,04
1,0	3,66	3,63	3,39	3,24	3,24	3,24
1,2	3,75	3,73	3,61	3,47	3,43	3,44
1,4	3,95	3,94	3,76	3,66	3,57	3,57
1,6	3,95	4,14	3,89	3,79	3,69	3,66
1,8	4,26	4,29	4,00	3,91	3,79	3,73
2,0	4,38	4,40	4,09	3,92	3,86	3,73

Соотношение между мгновенным и средним значением ускорения на пути падения снаряда выражается равенством

$$j_{\text{ср}} = \frac{\int_0^H \frac{Q}{z} e^{-\frac{2z}{M}H} dH}{H}$$

после интегрирования

$$j_{\text{ср}} = \frac{Q}{2zH}\left(1 - e^{-\frac{2z}{M}H}\right). \tag{15}$$

Табл. 6, где приведены значения мгновенных ускорений для различных режимов, показывает, что ускорение при падении снаряда в скважине на протяжении хода меняется значительно и рассматривать его как постоянную величину нельзя.

Величина среднего значения ускорения, при прочих равных условиях, как следует из формулы (15), также зависит от величины хода снаряда H. Важнейшим следствием этого является то, что, с точки зрения повышения производительности станков, существует высота падения снаряда, превышать которую нерационально.

Таблица 6

Плотность шлама, *кг/дм*³	Высота падения снаряда, *м*	Мгновенное ускорение снаряда (*м/сек*²) в скважине при высоте столба шлама (*м*), равной							
		2		4		6		8	
		из опыта	по формуле (15)	из опыта	по формуле (15)	из опыта	по формуле (15)	из опыта	по формуле (15)
1,20—1,35	0,2	9,02	9,02	8,25	8,23	7,59	6,72	7,04	6,91
	0,4	8,58	8,55	7,71	7,63	6,93	7,08	6,3	6,10
	0,6	8,36	8,11	7,15	7,07	6,27	6,50	5,61	5,43
	0,8	7,92	7,71	6,71	6,55	5,72	5,06	5,06	4,82
	1,0	7,70	7,31	6,16	5,87	5,17	5,46	4,40	4,28
2,00—2,10	0,2	8,58	8,39	7,48	7,37	6,60	6,46	5,72	5,54
	0,4	7,70	7,54	6,60	6,43	5,12	5,49	4,84	4,53
	0,6	6,93	6,80	5,83	5,61	4,95	4,66	4,18	3,71
	0,8	6,30	6,11	5,06	4,89	3,0	3,95	3,41	3,08
	1,0	5,60	5,50	4,51	4,26	3,41	3,34	2,75	2,56
2,30—2,35	0,2	8,03	—	7,04	6,96	5,94	6,06	5,17	5,17
	0,4	7,05	—	6,05	5,90	5,04	4,96	4,40	4,13
	0,6	6,27	—	5,17	5,08	4,69	4,14	3,63	—
	0,8	5,61		4,40	4,16	3,52	3,42	2,75	2,71
	1,0	4,80	—	3,86	3,56	2,86	2,80	2,20	2,09

На рис. 3 приведены графики изменения работоспособности[1] снаряда в зависимости от высоты падения, причем по оси ординат отложена предельно возможная (для данной высоты падения) работа снаряда на забое за единицу времени A, равная $0{,}012\ P\alpha\ \sqrt{j^3 H}$ *кгм*. При определении значений, соответствующих различным H, ускорение $j_{ср}$ определялось по формуле (15). Графики имеют максимум в интервале 1,0—1,2 *м*. При падении с большой высоты работоспособность снаряда снижается, так как, начиная с высоты 1,0—1,2 *м*, скорость падения снаряда увеличивается незначительно (ускорение мало).

Чрезмерное увеличение высоты подъема затягивает время падения снаряда, что связано с необходимостью снижения числа ударов в единицу времени. Компенсация за это в виде небольшого приращения энергии единичного удара недостаточна, т. е. для буровых станков существует некоторая оптимальная высота подъема снаряда, превышать которую нерационально.

Увеличение плотности шлама, как видно при сравнении графиков рис. 3, существенно снижает максимальное значение ординаты графика $A = \varphi(H)$ Значение же H, соответствующее максимальным ординатам, меняется незначительно, при увеличении плотности шлама от 1,65 до 2,20 *кг/дм*³ — всего на 0,10 *м*.

Графики рис. 3 составлены применительно к станку БС-1 для случая бурения скважин диаметром 245—250 *мм*, снарядом весом 2000 *кг* при диаметре ударной штанги 180 *мм*, т. е. при загрузке станка почти на полную мощность. Следовательно, рациональная высота подъема при шламе оптимальной плотности заключена между предпоследним и последним значениями длин кривошипа. При бурении скважин диаметром 300 *мм* представляется возможным довести вес снаряда до 3500 *кг*,[2] но и в этом

[1] Под работоспособностью понимается та энергия, которая может быть отдана снарядом забою скважины в единицу времени при данной высоте падения H и максимально возможном для нее числе ударов в 1 мин.

[2] Для чего необходимо усилить некоторые узлы.

случае, как показали расчеты, предельно выгодная высота подъема $H \approx 1{,}2$ *м*. Киносъемка движущегося снаряда показала, что максимальная высота подъема снаряда на станке БС-1 равна примерно 1,17 *м*, т. е. замена существующего балансирного механизма станка типа БС-1 на новый (с большим ходом снаряда) с целью увеличения производитель-

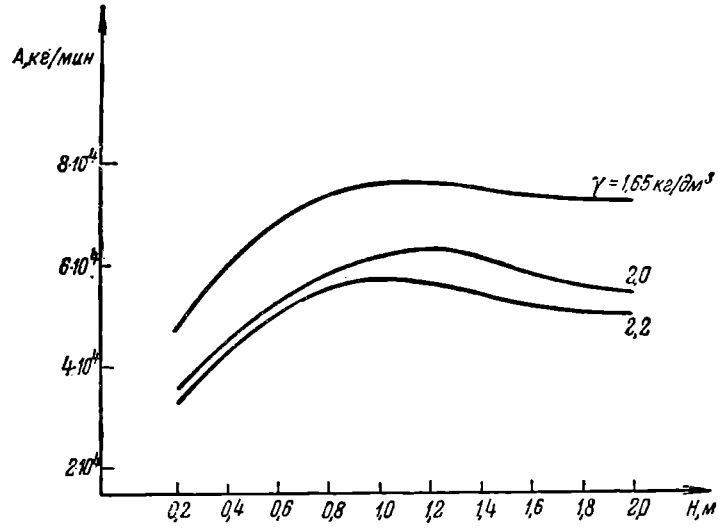


Рис. 3. Зависимость работоспособности снаряда м единицу времени от высоты падения при максимально возможном числе ударов. $h = 6$ *м*

ности, эффекта не даст. Поэтому при проектировании новых станков ударноканатного бурения, предназначенных для бурения скважин в крепких породах диаметром 250—350 *мм* и высоте мачты до 14 *м*, максимальный ход снаряда не должен превышать 1,2 *м*.

Определение веса бурового снаряда

Как известно, повышение скорости бурения возможно за счет увеличения веса инструмента. Максимально возможный вес бурового снаряда прямо пропорционален длине снаряда L и квадрату отношения диаметра штанги к диаметру долота k. Длина снаряда ограничена высотой мачты станка. Выбор значения относительного диаметра k фактически определяет диаметр ударной штанги, так как диаметр долота определяется условиями ведения взрывных работ. Для увеличения веса снаряда выгодно увеличивать k. Однако практикой установлено, что чрезмерное увеличение веса снаряда за счет увеличения k и, следовательно, диаметра снаряда, приводит к снижению скорости бурения.

Для иллюстрации влияния зазора между стенкой скважины и телом ударной штанги на скорость падения снаряда в скважине приведены графики фактических скоростей падения снаряда для трех различных диаметров (рис. 4). Они построены на основании данных, полученных при обработке материалов киносъемки. Скважины бурились долотом диаметром 196 *мм*, буровые снаряды имели диаметры 130, 150 и 190 *мм* и соответственно вес 600, 1050 и 1850 *кг* при длине 6,40; 8,10; 8,30 *м*.

При большем диаметре скорость падения снаряда, как видно из рис. 4, значительно ниже, чем при меньших диаметрах и нарастание ско-

рости происходит при малых высотах падения (до 0,5 *м*). Полученные данные опыта хорошо совпадают с расчетными (графики, изображенные пунктирной линией).

Расчетным путем были получены зависимости работы снаряда на забое от отношения диаметра штанги к диаметру долота для оптимальной плотности шлама (рис. 5). Рациональное значение отношения диаметра ударной штанги к диаметру долота k, как видно из рис. 5, зависит от уровня шлама в скважине. Оптимальное значение k, соответствующее различным уровням, заключено сравнительно в узком интервале 0,765—0,820. Значение 0,765 соответствует весьма нерациональному шламовому режиму с запущенной чисткой скважины; 0,820 — наоборот, соответствует случаю слишком частой чистки. Оба эти случая не характерны и в практике бурения встречаются редко. Однако важно заметить, что даже в условиях неблагоприятного шламового режима значение k не следует принимать меньшим 0,76. Значение $k = 0{,}820$ дает крайний максимальный предел диаметра ударной штанги.

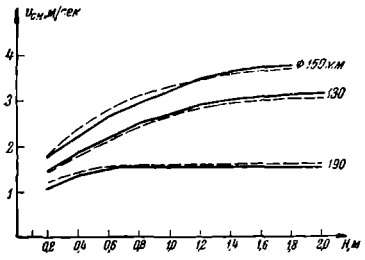


Рис. 4. Зависимость скорости падения от высоты падения для снарядов диаметром 150, 130, 190 *мм* в скважине, пробуренной долотом диаметром 196 *мм*:

———— из опыта;
по расчету

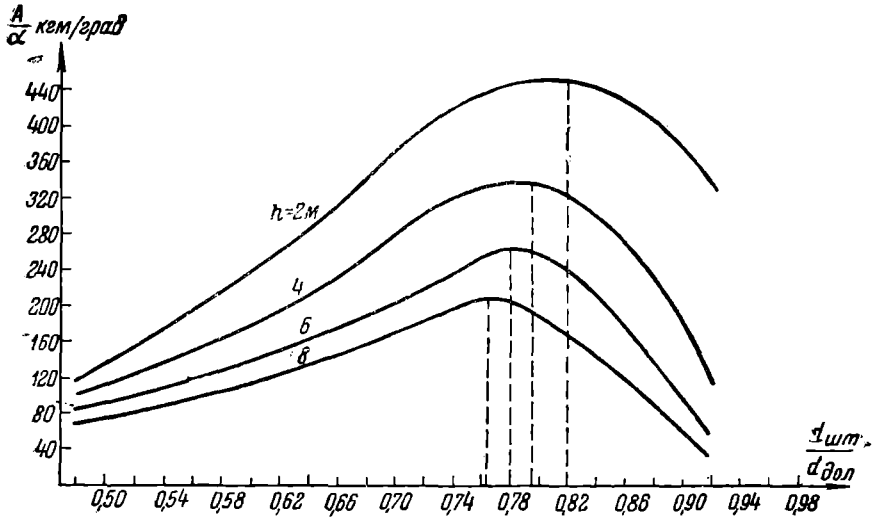


Рис. 5. Зависимость работы снаряда на забое скважины от отношения $\frac{d_{шт}}{d_{дол}}$ и уровня шлама в скважине. Графики построены для шлама при $\gamma = 2$ *кг/дм*^{3}; $d_{дол} = 230$ *мм*

Распределение энергии снаряда при бурении

Энергия снаряда, накапливаемая во время падения, расходуется на разрушение забоя скважин, переизмельчение буровой мелочи, деформацию инструмента, преодоление сопротивления шлама и некоторое ее количество поглощается компенсатором.

Разделение энергии, затраченной на разрушение забоя скважины с нормальным измельчением буровой мелочи от энергии, затраченной на переизмельчение, можно выполнить через выявление зависимости

удельной работы бурения от плотности шлама в скважине и определением ее минимального значения. Разность между удельной работой бурения, соответствующей некоторой плотности шлама и минимальным значением работы бурения, определит то количество энергии, которое пошло на переизмельчение буровой мелочи при выбуривании 1 *см*³ объема скважины. Если возможную работу снаряда на забое в течение 1 мин. при плотности шлама 1,2 *кг/дм*³ принять за 100, то эта энергия будет распределяться примерно так, как это показано на табл. 7. Доля

Таблица 7*

Плотность шлама, *кг/дм*³	Энергия, затраченная, %				
	на разрушение забоя скважины с нормальным измельчением буровой мелочи	на переизмельчение буровой мелочи	на преодоление сопротивления бурового шлама падению снаряда	на деформацию бурового инструмента	на усадку компенсатора
1,20	28	56	0 (условно)	8,0	8,0
1,30	34	42	16	5,0	5,0
1,70	51	13	28	3,5	4,5
2,00	57	0 (условно)	35	3,2	3,8
2,20	44	9	41	3,0	3,0
2,35	25	24	46	2,3	2,7

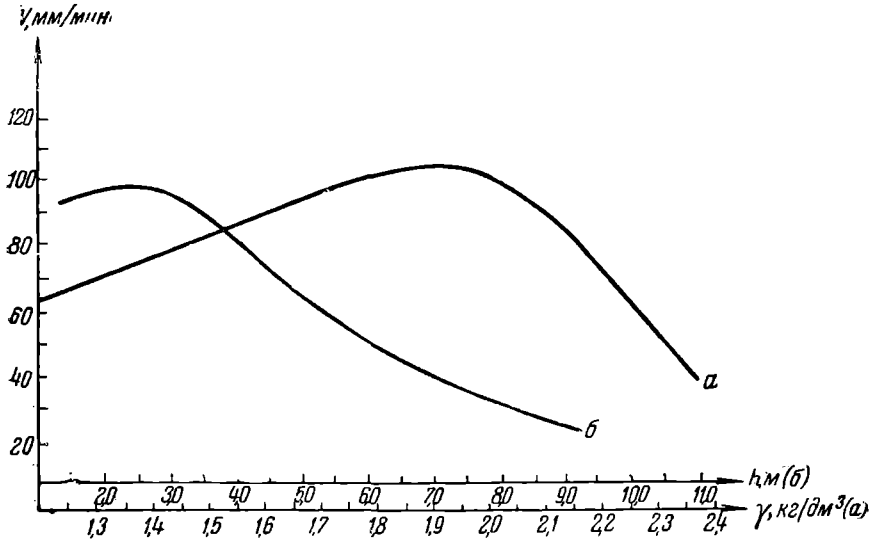


Рис. 6. Зависимость скорости бурения от плотности (*а*) и высоты (*б*) шламового столба в скважине

полезно затрачиваемой энергии растет с увеличением плотности шлама, достигая максимума при плотности 2 *кг/дм*³ (для пород с удельным весом 3).

Дальнейшее увеличение плотности влечет снижение полезно расходуемой доли энергии. В соответствии с распределением энергии снаряда меняется и скорость бурения (рис. 6, кривая *а*).

* Данные таблицы относятся к случаю бурения скважины долотом диаметром 230 *мм* при уровне шлама в скважине 4 *м*, оптимальной «навеске» долота над забоем скважины и максимально возможном для данной плотности шлама числе ударов в 1 мин.

Высота шламового столба также сильно влияет на скорость бурения. При уровне шлама в скважине 9,5 *м* механическая скорость бурения составляет всего лишь 25% от максимальной (рис. 6, кривая *б*). Чтобы поддержать скорость бурения в некотором интервале, обеспечивающем эффективное бурение, скважину периодически очищают желонкой. Так как на желонение тратится некоторое количество времени, то среднюю скорость (с учетом времени желонения) можно выразить

$$v_{\text{ср}_\text{ц}} = \frac{H'}{(t_\text{б} + t_\text{ж})},$$

где $t_\text{б}$ — время бурения;
$t_\text{ж}$ — время желонения;
H' — углубка скважины за время бурения;
$v_{\text{ср}_\text{ц}}$ — средняя скорость бурения за цикл с учетом времени желонения.

Очевидно, средняя скорость всех циклов смены

$$v_{\text{ср}_\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} v_{\text{ср}_\text{ц}}}{n} = \frac{l}{\sum_{i_n=1}^{i_n=n} (t_\text{б} + t_\text{ж})},$$

где n — число циклов в смену;
l — проходка за смену;
$\sum_{i_n=1}^{i_n=n} (t_\text{б} + t_\text{ж}) = T_\text{осн}$ — время смены, затраченное на основные операции — бурение $t_\text{б}$ и желонение $t_\text{ж}$.

Средняя скорость бурения, определенная таким образом, характеризует степень совершенства технологии бурения с учетом доли времени, затраченного на чистку скважины.

На основании многочисленных данных хронометража вычислена средняя скорость $v_{\text{ср}_\text{см}}$, соответствующая различным интервалам желонения при бурении в шламе оптимальной плотности [1]:

Уровень шлама в скважине, по достижении которого произведено желонение, *м*	$v_{\text{ср}_\text{см}}$, *см/мин*
3,1	3,1
4,2	4,9
5,7	5,4
6,1	5,4
6,7	5,2
7,3	5,0
8,2	4,4

Максимальное значение средней скорости бурения имеет место с желонением шлама по достижению уровня при опущенном на забой снаряде 5,5—6,0 *м*.

---

[1] Данные относятся к случаю бурения скважин диаметром 230 *мм*, снарядом весом 2000 *кг* в пикритовом и токситовом габбродиабазах.

В табл. 8 приведено сравнение производительности станков, работающих на случайных и оптимальных параметрах шламового режима. Для сравнения использованы данные опытного бурения и фотохрононаблюдений за работой однотипных станков № 48, 50 и 47, работающих на аналогичных породах. При бурении станками № 48 и 50 никакого внимания организации шламового режима не уделялось.

Значения затрат сменного времени на основные операции и соответствующий им объем работ по каждой хроно-фотокарте с расчетом $v_{ср_{см}}$ приведены в табл. 8.

Таблица 8

Номер станка	Дата наблюдений июнь 1953 г.	$T_{осн} = \sum_{i_n=1}^{i_n=n} (t_{Б_i} + t_{ж_i})$, мин.	Объем работы, *м*	$v_{ср_{см}}$, *см/мин*	$T_{осн}$, %
48	7	390	11	2,8	81,2
50	7	375	11	2,9	78,2
48	8	345	10,1	3,0	71,3
50	8	340	10,7	3,1	70,8
48	9	350	9,2	3,1	72,9
50	9	325	10	3,1	67,7
50	12	242	7,5	3,0	50,6
50	15	335	12,5	3,7	70,0
50	26	255	8,2	3,2	53,2
Среднее		328		3,1	68,4

Как видно из таблицы, в среднем 328 мин. или 68,4% сменного времени затрачивается на основные операции. При среднем значении $v_{ср_{см}}$ 3,1 *см/мин* средняя производительность

$$l_{см} = v_{ср_{см}} T_{осн}, \quad l_{см} = 3{,}1 \quad 328 = 10{,}17 \ м/смена.$$

При поддержании в скважине шлама оптимальной плотности, равной для данных условий 2 *кг/дм*^{3}, и правильно выбранных интервалах чистки скважины скорость $v_{ср_{см}}$, как показывают опыты, может достигать 5,4 *см/мин.*

Таким образом, при тех же затратах сменного времени на основные операции (68,4%) производительность

$$l_{см} = 328 \quad 5{,}4 = 17{,}7 \ пог.м.$$

Таким образом, за счет бурения в шламе оптимальной плотности и своевременной очистки скважины средняя производительность может быть увеличена примерно на 50—60%. Если же непрерывно удалять шлам из скважины, то среднесменную производительность можно еще увеличить на 35—45% и довести выработку станка до 20—25 *м/смена,* т. е. увеличить производительность станков, по сравнению с существующей, на 100%.

Эффективным средством дальнейшего повышения производительности ударноканатных станков является увеличение их грузоподъемной мощности. Это в первую очередь относится к станку типа БУ-2. На большинстве открытых рудников СССР эти станки используются для бурения скважин долотами с длиной лезвия 230 *мм* и ударной штангой диаметром 150 *мм* ($k = \frac{150}{230} \approx 0{,}65$).

При длине снаряда 9,5 *м* станок загружен на полную грузоподъемную мощность (1300 *кг*). При этом $k = 0{,}65$. Оптимальное же значение k для скважины этого диаметра равно около 0,79, что при длине снаряда 8,5—9 *м* соответствует грузоподъемной мощности 1800—1900 *кг*.

Приращение производительности при увеличении грузоподъемной мощности станка до 1900 *кг* можно оценить, пользуясь графиками рис. 5, где отношению $k = 0{,}65$ соответствует работа снаряда на забое в 1 мин., равная $220 \times 174 = 38\,280$ *кгм* ($\alpha = 174°$ при $R = 330$ *мм*) и отношению $k = 0{,}79$, равному $220 \times 174 = 46\,980$ *кгм*. Следовательно, скорость бурения увеличится на 22%.

Грузоподъемная мощность станков БС-1 позволяет бурить скважины долотами с длиной лезвия 230—250 *мм* при оптимальном отношении диаметра ударной штанги к диаметру долота. Поэтому в данном случае увеличить скорость бурения станка за счет утяжеления снаряда невозможно.

Однако, учитывая, что скважины служат для размещения зарядов ВВ, сменная производительность станка определяется выбуренным за смену объемом породы. С этой точки зрения для дальнейшего повышения производительности станков желательно увеличить диаметр скважин до 300—350 *мм*, доводя при этом грузоподъемную мощность станков до 3600—3700 *кг*. Для Норильских открытых рудников увеличение диаметра скважин, вероятно, существенно не увеличит кусковатости. По крайней мере, увеличение номинального диаметра скважин с 230 до 250 *мм* существенно не ухудшило кусковатости. В то же время эта мера сопровождалась увеличением сменной производительности станков БС-1 и ростом выхода горной массы с 1 *пог. м* скважины. Производительность экскаваторов на погрузке руды при увеличении диаметра скважины с 230 до 250 *мм* осталось практически на прежнем уровне (табл. 9). Расчет показывает, что увеличение диаметра долота с 230 до 300 *мм* с соответственным повышением грузоподъемной мощности станков БС-1 до 3700 *кг* позволит поднять их производительность по выбуренному объему скважины на 40—45%.

Регулировка рабочей длины каната в процессе бурения представляет известные трудности и, как правило, приводит к нерациональным затратам энергии бурового снаряда на чрезмерное сжатие компенсатора и растяжение каната. Киносъемкой выявлено, что в зависимости от навыка машиниста эти потери составляют от 10 до 20% всей энергии снаряда. Энергия эта может быть полезно использована при автоматизированной подаче инструмента на забой.

Таблица 9

Месяц	Диаметр скважины 230 *мм* (1953 г.)		Диаметр скважины 250 *мм* (1954 г.)	
	выход горной массы с 1 *пог. м* скважины, *т/м*	производительность экскаватора в 1 час чистой работы, *т*	выход горной массы с 1 *пог. м* скважины, *т/м*	производительность экскаватора в 1 час чистой работы, *т*
Январь	54	222	67	209
Февраль	52	225	—	203
Март	—	203	80	201
Апрель	51	193	82	202

Приращение производительности бурения в результате осуществления

нормализации шламового режима .	достигает	52%
автоматического удаления шлама из скважины		97%
увеличения грузоподъемной мощности для станка БУ-2 до 2000 *кг*		22%
автоматизации подачи снаряда на забой		10—20%
увеличения грузоподъемной мощности станка БС-1 до 3500 *кг*		45%

Нормализация шламового режима и автоматическое удаление шлама из скважины — мероприятия, взаимно исключающие друг друга, поэтому общее увеличение производительности с обычным способом чистки скважины равно примерно 94%, при автоматическом удалении шлама из скважины около 130%.

Использованная литература

1. Алексеев О. И. Некоторые результаты исследования буровзрывных работ на Коунрадском руднике. Сб. Совершенствование открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Углетехиздат, 1955.

2. Куличихин Н. И. и Воздвиженский Б. И. Разведочное бурение. Госгеолиздат, 1949.

3. Назаров П. П. Рациональный технологический режим работы станков ударно-канатного бурения. Сб. Совершенствование открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Углетехиздат, 1955.