

О. Д. АЛИМОВ, Л. Т. ДВОРНИКОВ

БУРЕНИЕ ШПУРОВ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ

Одним из основных параметров вращательного способа бурения шпуров, влияющим на производительность и экономическую целесообразность бурильных работ, является скорость бурения.

Скорость бурения, в свою очередь, может в значительной степени изменяться в зависимости от величины осевого усилия прижатия (подачи) бурового инструмента к забою, числа оборотов бурового инструмента в единицу времени, физико-механических свойств буримых горных пород, диаметра и геометрии бурового инструмента, мощности двигателя бурильной машины, способа удаления из забоя шпура буровой мелочи. Влияние этих факторов на скорость бурения изучалось в основном экспериментально [1—26]. Каждое из указанных исследований, как правило, охватывает довольно узкий диапазон возможных условий, ограниченный либо возможностями определенной бурильной машины, либо заранее заданной геометрией режущего инструмента, либо определенными физико-механическими свойствами горных пород и т. д. В силу таких специфических особенностей эксперимента исследователи получали различные результаты и давали рекомендации, нередко, на первый взгляд, несопоставимые.

В настоящее время возникла необходимость в обобщении всего накопленного материала для разработки рекомендаций по выбору целесообразных режимов вращательного бурения шпуров в различных горных породах и параметров бурильных машин.

Авторы данной статьи пытались осуществить такое обобщение. Основой для этого послужили многочисленные данные о режимах бурения, опубликованные в литературе, а также результаты экспериментальных работ авторов, проведенных в последние годы в Томском политехническом институте. В данной статье излагаются лишь основные результаты обобщения.

Значительное влияние на процесс вращательного бурения оказывают физико-механические свойства. Для оценки их влияния введены такие понятия, как хрупкость, пластичность, твердость, контактная прочность, крепость, абразивность, влажность и др. В большинстве случаев исследователи характеризуют сопротивление горных пород разрушению при бурении или крепостью (прочностью на сжатие), или твердостью (прочностью на вдавливание) и абразивностью.

Взаимное влияние этих факторов очень сложное и может быть учтено лишь при достаточно полном изучении упругости, пластичности,

абразивности и других свойств разнообразных горных пород, и их взаимосвязей. В связи с этим значительный интерес представляют работы по изучению физико-механических свойств горных пород, проводимые в последнее время школами проф. М. М. Протодяконова и Л. А. Шрейнера. Пока же имеющиеся данные не позволяют достаточно точно учесть и рассчитать влияние каждого из факторов. Поэтому сохраняет свою ценность метод учета влияния основных физико-механических свойств в совокупности по крепости, предложенный в свое время проф. М. М. Протодяконовым [20]. К тому же абсолютное большинство данных по режимам бурения шпуров связаны с горными породами через коэффициент крепости. Между коэффициентом крепости и другими характеристиками горных пород (твердостью по Шрейнеру, твердостью по Шору и т. д.) установлено ряд корреляционных зависимостей. Ставя перед собой задачу обобщения результатов экспериментальных исследований и учитывая указанное выше, мы приняли коэффициент крепости f за основную механическую характеристику пород.

Влияние усилия подачи

Величина осевого прижатия режущего инструмента к забою шпура — усилие подачи — оказывает определяющее значение на скорость бурения.

Зависимость скорости вращательного способа бурения шпуров от усилия подачи принята основным показателем эффективности бурения в большинстве экспериментальных исследований. В настоящее время накопилось значительное количество данных по этой зависимости, охватывающих большой диапазон горных пород с различными физико-механическими свойствами. Наиболее наглядно качественная зависимость скорости бурения от усилия подачи представлена Л. А. Шрейнером [26]

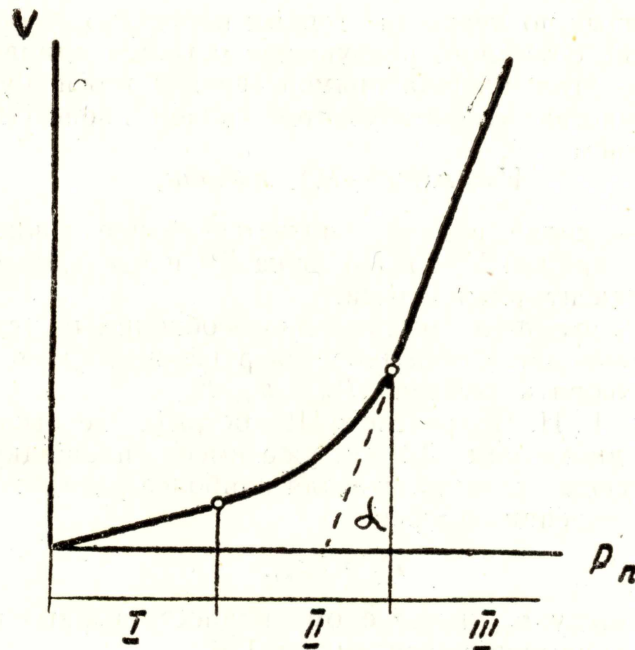


Рис. 1.

(рис. 1). Эта зависимость очерчивается кривой, которая имеет три явно выраженных зоны.

1-я зона характеризуется разрушением горной породы истиранием. Применяемый режущий инструмент не абсолютно остр и поэтому сопри-

касается с породой по некоторой контактной площадке $F_{ш}$. Усилие подачи P_n в I зоне недостаточно для внедрения инструмента в породу, то есть удельное давление инструмента на забой $p = \frac{P_n}{F_{ш}}$ кг/мм² меньше твердости горной породы $p_{вд}$, кг/мм².

II-я зона характеризуется соотношением $p_{вд} \geq p$ между твердостью $p_{вд}$ и удельным давлением p . Этот участок кривой, по данным Г. Н. Покровского [19], описывается степенной зависимостью между скоростью бурения и усилием подачи

$$V = aP_n^m,$$

где V — скорость бурения;

a — постоянный для определенной горной породы коэффициент;

m — показатель степени, зависящий от физико-механических свойств горных пород.

В I и II зонах мощность бурильной машины в основном расходуется на преодоление сил трения инструмента о забой, что приводит к значительному абразивному износу инструмента и малой производительности бурения. Энергоемкость процесса разрушения в I и II зонах большая. С увеличением усилия подачи она уменьшается и в зоне III достигает минимума. В этом случае мощность бурильной машины расходуется наиболее целесообразно — на скалывание крупных частиц горной породы. Исходя из этого, изучению закономерностей процессов разрушения горных пород в зоне III следует уделить основное внимание.

Анализируя данные различных исследований, можно прийти к выводу, что для всех горных пород средней крепости с $f \leq 10-12$, которые могут эффективно разрушаться при бурении вращательным способом резцами диаметром 40—45 мм, зона III (рис. 1) наступает уже при усилиях подачи от 100 до 400 кг.

Для различных по крепости горных пород характер зависимости $V = f(P_n)$ в зоне объемного разрушения остается одинаковым, изменяется лишь α — угол наклона прямой (рис. 1) к оси абсцисс.

Для большинства случаев участок кривой в зоне III может быть описан уравнением

$$V = \kappa (P_n - P_0), \text{ мм/мин}, \quad (1)$$

где $\kappa = b \cdot \operatorname{tg} \alpha$ — усилие подачи, соответствующее точке пересечения прямой $V = f(P_n)$ (зона III) и оси абсцисс, кг;

b — коэффициент размерности.

Величина P_0 является минимально необходимым усилием подачи, при котором начинается объемное разрушение горных пород, и она должна удовлетворять условию $P_0 \geq p_{вд} \cdot F_{ш}$.

По данным Г. Н. Покровского [19], острый, не бывший в работе резец типа РП диаметром 42 мм, уже имеет площадку затупления $F_{ш} \approx 5 \text{ мм}^2$. Отсюда следует, что для наиболее распространенного инструмента при бурении шпуров

$$P_0 \geq 5p_{вд}. \quad (2)$$

Теоретически между $p_{вд}$ и пределом прочности горных пород на сжатие $\sigma_{сж}$ кг/мм² существует зависимость [26]

$$\frac{p_{вд}}{\sigma_{сж}} = (1 + 2\pi) \approx 7. \quad (3)$$

Отметим только, что это соотношение экспериментально не всегда соблюдается, и поэтому может быть принято с большим приближением.

Если учесть, что коэффициент крепости горных пород, по М. М. Протождяконову [20], $f = \sigma_{сж}$, то из (2) и (3) $p_{вд} \approx 7f$ и

$$P_0 \geq 7 \cdot 5f = 35f. \quad (4)$$

Для пород с f от 3 до 12 усилие P_0 , подсчитанное по формуле (4), составит $P_0 = (105 + 420) \text{ кг}$, что достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Между величиной угла α и твердостью горной породы или коэффициентом крепости по шкале проф. М. М. Протождяконова можно заметить существование зависимости вида

$$\kappa = b \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{a_1}{p_{вд}} \quad \text{или} \quad \kappa = b \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{a_2}{f},$$

где a_1 и a_2 — коэффициенты, зависящие от числа оборотов бура и степени износа резца.

Максимальное значение a_1 и a_2 соответствует оптимальному числу оборотов бура $n_{опт}$, то есть такому, при котором достигается максимальная скорость бурения и минимальная энергоемкость процесса разрушения $A_{об}$.

В табл. 1 сведены данные многих исследователей, показывающие зависимости между скоростью бурения и усилием подачи при числах оборотов, называемых исследователями оптимальными для различных горных пород. В этой же таблице по формуле (1) и (4) подсчитаны средние значения P_0 и κ .

Таблица 1

Наименование горной породы и коэффициент крепости	Оптимальное число оборотов в минуту	Усилие подачи $P_{п}$ кг,	Скорость бурения V , мм/мин	Усилие P_0^* кг	$P_{п} - P_0$ кг	$\kappa_{ср}$	Автор и ссылка на источник
1	2	3	4	5	6	7	8
Уголь, $f = 2-3$	800	50	375	0	50	7,0	П. Н. Июдин [14]
		75	500	0	75		
		115	820	0	115		
Мелкозернистый песчаник, $f = 4-5$	425	300	970	60	240	3,7	А. Н. Волков [8]
		430	1350		370		
		650	2220		590		
Алеврит, $f = 5$	450	290	1020	0	290	3,45	А. Н. Волков [8]
		425	1450		425		
Некрепкий песчаник, $f = 6$	270	250	300	100	150	2,00	А. Д. Имас [12]
		320	430		220		
		380	640		280		
Мрамор, $f = 6$	525	100	160	20	80	2,00	О. Д. Алимов Н. С. Колодяжный В. Н. Карминский [5]
		150	270		130		
		180	360		160		

1	2	3	4	5	6	7	8
Известняк, $f = 6$	400	400 600 800	400 720 1180	200	200 400 600	1,9	Г. Н. Покровский [19]
Песчаник, $f=6-8$	400	250 380 760	250 500 1140	90	160 290 670	1,66	Н. С. Колодяжный [15]
Среднезернистый песчаник, $f = 8$	270	550 750 1100	450 700 1330	290	260 460 810	1,56	А. Н. Волков [8]
Известняк, $f = 10$	345	250 420 600	150 330 650	120	130 300 480	1,17	И. Е. Рудаковский [22]
Доломитизирован- ный известняк, $f = 12$	345	750 200	725 50	120	630 80	0,71	"
Доломитизирован- ный известняк, $f = 12$	345	385 375	200 360	120	265 455	0,71	"
Грубозернистый кварцевый песча- ник, $f = 14-17$	200	500 850 1100	61 112 149	250	250 600 850	0,20	М. К. Цехин [25]

*) Усилие P_0 определялось графически по экспериментальным данным, $\kappa_{\text{ср}}$ определялось как $\kappa_{\text{ср}} = \frac{\sum \kappa}{n}$, где $\kappa = \frac{V}{P_{\text{п}} - P_0}$.

Для меньших равно как и для больших чисел оборотов, чем $n_{\text{опт}}$, величина κ и скорость бурения уменьшаются.

Для иллюстрации сказанного на рис. 2, по данным А. Н. Волкова [9] (кривая 1) и И. Е. Рудаковского [22], нами построена зависимость $\kappa = f(n)$ при постоянном усилии подачи. Максимальное значение κ соответствует числу оборотов бура в минуту, рекомендуемому авторами оптимальным.

Анализируя результаты различных исследований, можно обнаружить, что при оптимальных скоростях вращения бура величина κ для каждой горной породы постоянна.

На основании данных табл. 1 на рис. 3 построена зависимость между величиной κ и коэффициентом крепости f . Эта зависимость, по нашему мнению, может быть принята в первом приближении как характеристика эффективности вращательного бурения шпуров диамет-

ром 42 мм в горных породах различной крепости. Коэффициент k может быть назван коэффициентом эффективности бурения.

Считаем необходимым отметить, что коэффициент эффективности бурения k характерен для данного инструмента и для данного способа бурения. Очевидно, при других размерах инструмента и других способах бурения (алмазном, шарошечном) он будет несколько иным.

Если бы удалось в ближайшее время определить подобные характеристики эффективности для различных способов бурения, то это бы значительно облегчило проведение расчетов возможных ско-

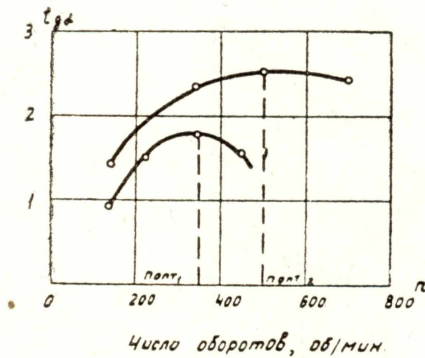


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропорциональности k от скорости вращения бурового инструмента при постоянном усилии подачи.

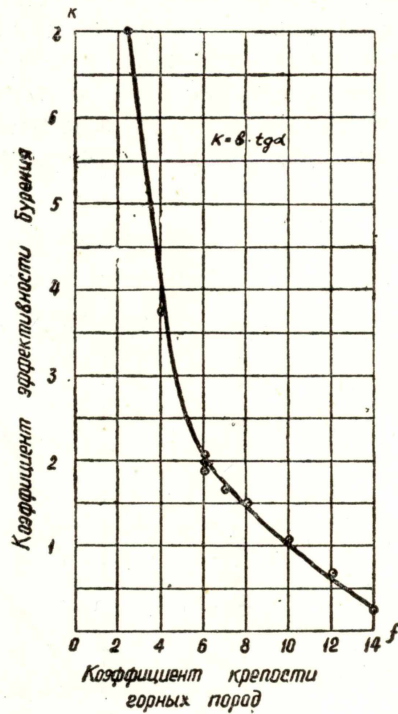


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности вращательного бурения от крепости буримых пород.

ростей бурения, выбор и обоснование целесообразного бурового оборудования.

Действительно, пользуясь рис. 3 и формулой $P_0 \approx 35 f$, легко найти по формуле (1) возможную максимальную скорость бурения для данного усилия подачи P_n и оптимального числа оборотов. Из табл. 2

Таблица 2

Горная порода (автор исследований)	Экспериментальные данные		Скорость бурения по формуле (1), мм/мин	Отклонение расчетной скорости от экспериментальной, %
	усилие подачи, кг	скорость бурения, мм/мин		
Глинистый сланец, $f=4-5$ (М. К. Цехин [25])	500	960	1100	+12,7
Алеврит, $f=5$ (А. Н. Волков [8])	1000	2000	2150	+7,5
Песчаник мелкозернистый, $f=10,7$ (М. К. Цехин [25])	850	453	425	-6,2
Известняк, $f=10$ (И. Е. Рудаковский [22])	750	700	450	-35
Известняк, $f=6$ (Г. Н. Покровский [19])	800	1420	1260	-11,5
Песчаник, $f=14$ (наши данные [4])	1500	400	300	-25

видно, что расчетные скорости бурения хорошо согласуются с экспериментальными.

На основании выявленной зависимости (1) оказалось возможным предварительно рассчитывать скорости бурения различных горных пород в зависимости от усилия подачи (рис. 4). Максимально возможные величины скорости вращательного бурения будут, видимо, ограничиваться геометрией и прочностью бурового инструмента. Поэтому представляет интерес вопрос насколько значительно можно увеличить зону потенциальных возможностей бурильных машин вращательного действия. Для ответа необходимо установить, до каких величин усилий

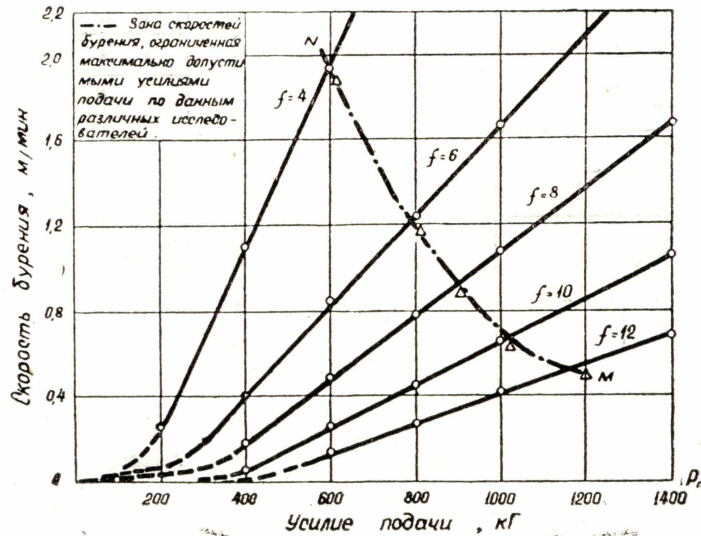


Рис. 4.

подачи сохраняется линейная зависимость $V = f(P_n)$. Наиболее очевидными критериями нарушения линейности $V = f(P_n)$ в верхней части кривой являются: геометрия резцов, их стойкость и интенсивность удаления штыба из-под резца. Различные исследователи каждому из этих критериев придают большее или меньшее значение.

Из геометрических элементов резца на максимальную скорость бурения прежде всего может оказать влияние задний угол. Это положение принимается во внимание многими исследователями. Дело в том, что при больших удельных подачах на оборот может происходить касание задней гранью резца забоя шпура. Последнее вызовет необходимость дополнительных усилий подачи и мощности машины на преодоление сил трения и смятия породы задней гранью резца, то есть приведет к уменьшению интенсивности роста скорости бурения от усилия подачи.

При бурении резец перемещается как вдоль собственной оси, так и вокруг нее. Угол наклона винтовой траектории движения резца непостоянен по радиусу, он уменьшается к периферии и увеличивается к центру резца. Угол же приострения (угол заточки) выполняется одинаковым по всей длине лезвия. Отсюда следует, что при увеличении глубины внедрения резца за оборот площадка задней грани резца может начать касаться забоя участками, расположенными ближе к центру. Дальнейшее увеличение подачи вызовет касание забоя всей задней гранью. Для устранения возможности касания задней гранью резца забоя в средней части резцов, около центра их вращения, делают рассечку. Величина рассечки оценивается диаметром рассечки d_p .

Максимальная величина подачи на оборот h_{\max} с учетом диаметра рассечки, при которой резец работает, не касаясь задней гранью забоя, может быть определена по формуле

$$h_{\max} = \pi d_p \operatorname{tg} \beta, \quad (5)$$

где β — задний угол заточки лезвия бурового инструмента. Задний угол β резцов типа P_n , выпускаемых в настоящее время, составляет 18° , а диаметр рассечки $d_p = 6$ мм. Для этого случая $h_{\max} = 6,1$ мм. При такой подаче на оборот пропорциональная зависимость $V = f(P_n)$ может нарушиться. С учетом этого для чисел оборотов (200—400 об/мин), наиболее широко применяемых при вращательном бурении шпуров, максимальная скорость бурения при h_{\max} составит 610 и 2440 мм/мин. Таким образом, линейная зависимость $V = f(P_n)$ сохранится лишь до указанных скоростей бурения.

Увеличение h более h_{\max} приведет к резкому возрастанию $A_{об}$, так как при этом значительная часть энергии будет расходоваться нерационально — на смятие и истирание забоя задней гранью резца. Увеличение $A_{об}$ может произойти и раньше за счет ухудшения условий удаления разрушенной мелочи. Это было зафиксировано некоторыми исследователями [8, 25].

На рис. 5 приведена зависимость $V = f(P_n)$ в наиболее общей форме с учетом влияния контакта резца по задней грани при больших удельных подачах. Точка A соответствует началу касания задней гранью резца (по рассечке) забоя, точка B — касанию породы всей задней гранью резца.

Работа в зоне IV нецелесообразна, так как это сопряжено со значительными усилиями подачи.

Следует отметить, что касание забоя всей площадкой задней грани резцов РП может иметь место лишь при очень больших удельных подачах резца, то есть при очень больших скоростях бурения. Так, скорости вращения бура $n = 200$ об/мин будет соответствовать скорость бурения 8600 мм/мин, а $n = 400$ об/мин соответственно 17200 мм/мин. Практически такие скорости бурения современными бурильными машинами не могут быть получены.

Максимальные величины усилий подачи, а следовательно, и возможные скорости бурения будут ограничиваться также прочностью бурового инструмента. По данным различных исследователей [2, 9, 25], для существующего бурового инструмента диаметром 42 мм, армированного твердым сплавом ВК-8, ВК-15, осевое усилие не должно превышать 1200—1500 кг. Эти рекомендации сделаны для случая бурения наиболее крепких горных пород ($f = 8$ и выше), когда разрушение инструмента в основном происходит за счет осевого усилия при контакте инструмента с горной породой. При меньшей крепости горных пород

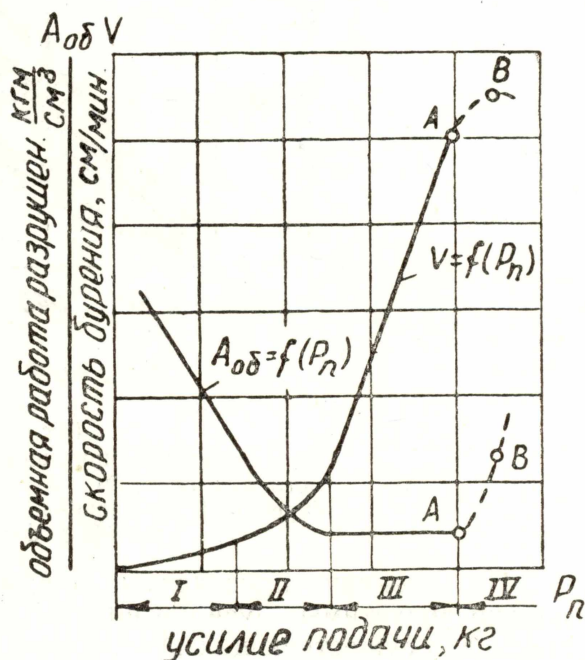


Рис. 5.

большую опасность для прочности инструмента будут представлять большие крутящие моменты, необходимые для скалывания крупной стружки.

Нашими исследованиями [2] установлено, что при одном и том же усилии подачи величина крутящего момента тем больше, чем меньше крепость породы (рис. 6). При этом увеличивается размах колебаний крутящего момента, а следовательно, и увеличиваются динамические нагрузки на лезвия инструмента, которые оказывают решающее влияние на стойкость бурового инструмента. Этим, частично, и объясняется то, что усилия подачи рекомендуются тем меньше, чем ниже крепость горной породы. Так, если для породы с $f > 10$ рекомендуется усилие подачи $P_{II} = 1200-1500$ кг, то с $f = 8-10$ оно снижается [9] до $800-1000$ кг; с $f = 6-7$ [19] до $750-800$ кг и с $f = 4-5$ [15] до $400-500$ кг.

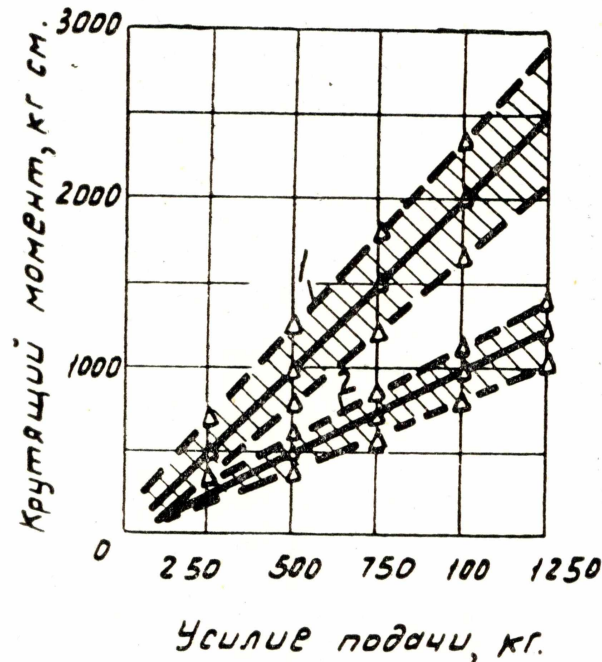


Рис. 6.

Зона изменения крутящего момента необходимого для вращения бура, при вращательном бурении 1 — песчаника и гранита, 2 — коронка № 4, $d=42$ мм.

На основании приведенных данных построена зависимость максимально допустимых усилий подачи от коэффициента крепости горных пород для существующих резцов типа РП (рис. 7).

Эта зависимость может быть использована при проектировании специальных (предназначенных для определенных условий) электро- и пневмосверл, а также для обоснования мощности двигателей сверл.

Создание более прочных материалов для армирования резцов, применяемых при вращательном бурении, безусловно, позволит увеличить указанные на рис. 7 пределы максимально допустимых усилий подачи, а следовательно, и скорости бурения. Для более прочных пластин твердого сплава появится и возможность уменьшения угла заточки резцов и увеличения удельных подач резцов на один оборот.

Удаление буровой мелочи из-под резца также может оказывать существенное влияние на верхний предел линейности функции $V = f(P_{II})$. На это обстоятельство указывается многими исследователями [2, 8, 25].

Практика бурения шпуров с промывкой указывает на некоторые трудности применения ее при больших скоростях бурения, когда для удаления буровой мелочи требуются большие расходы воды. Оказывается, количество воды, подаваемой в шпур, существенно ограничивается

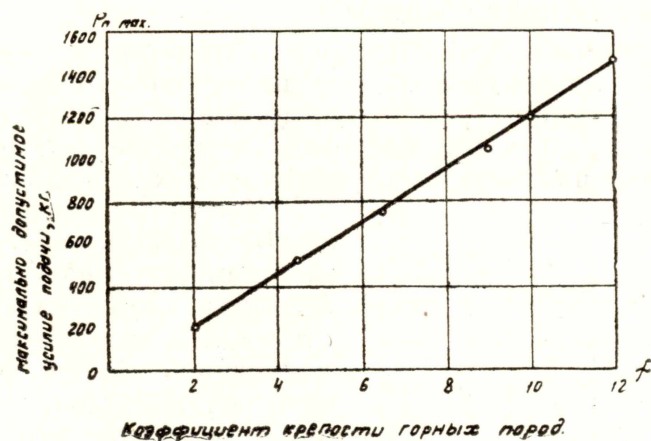


Рис. 7.

возможностями современного бурового инструмента и приспособлений для промывки (проходными сечениями внутренних каналов буровых штанг и резцов, подводимых муфт и шлангов и т. п.). Следовательно, повышение качества материала резцов и совершенствование способов удаления буровой мелочи из шпура позволит расширить диапазон целесообразных усилий подачи и возможных скоростей бурения.

Влияние скорости вращения инструмента

При постоянном усилии подачи скорость бурения горной породы растет с увеличением числа оборотов инструмента в минуту n . Большинство исследователей [9, 12, 19, 22, 26] установило, что значительный рост скорости бурения наблюдается лишь до некоторого предельного значения числа оборотов, после чего скорость бурения начинает увеличиваться медленнее, достигает максимума, а при дальнейшем увеличении числа оборотов даже уменьшается.

Наиболее наглядно эта зависимость представлена в работах В. С. Федорова [24] (рис. 8). Кривые 1, 2, 3 соответствуют усилиям подачи $P_1 > P_2 > P_3$. Такое изменение скорости бурения происходит в результате того, что подача инструмента на оборот резца с увеличением скорости его вращения уменьшается [19], несмотря на то, что размеры инструмента и величина усилия подачи остаются неизменными. Единого мнения о физической сущности явлений, которые

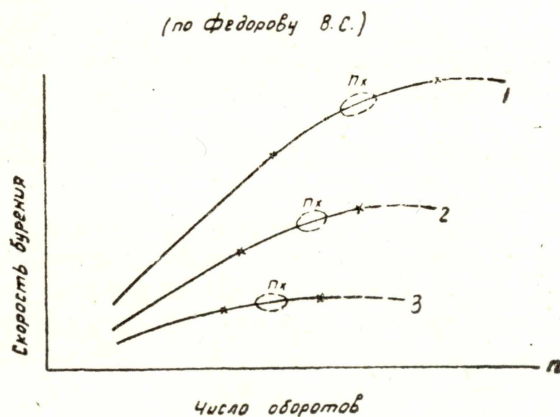


Рис. 8. Зависимость скорости бурения от скорости вращения бурового инструмента по В. С. Федорову.

приводят к уменьшению подачи на оборот, с увеличением скорости вращения резца, пока нет.

Увеличение скорости вращения инструмента для достижения максимальных скоростей бурения целесообразно лишь до некоторого предела (рис. 8). Эти пределы характеризуются [9, 12, 19] так называемыми критическими числами оборотов.

В. С. Федоровым и Л. А. Шрейнером указывается, что критическое число оборотов инструмента $n_{кр}$ зависит от усилия подачи и твердости горных пород. С увеличением твердости пород $n_{кр}$ уменьшается, с увеличением усилия подачи $n_{кр}$ несколько возрастает. Эти выводы подтверждаются большинством экспериментальных исследований.

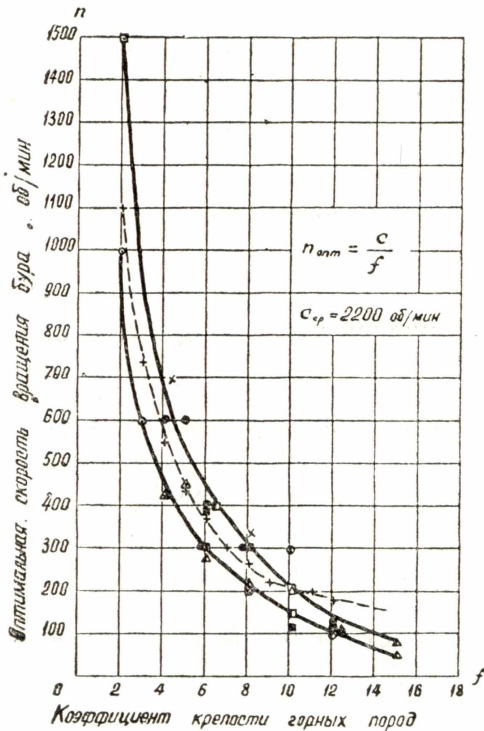


Рис. 9. Зона оптимальных скоростей вращения бурового инструмента в зависимости от крепости горных пород.

послужили для графического изображения интересующей нас зависимости, рис. 9.

Несмотря на некоторый разброс, точки, нанесенные на график, рис. 9, позволяют проследить зависимость $n_{кр} = \varphi(f)$, которая представлена некоторой зоной. Мы ограничили эту зону кривыми, которые, по нашему мнению, показывают диапазон максимальных и минимальных значений оптимальных чисел оборотов бурового инструмента при вращательном бурении шпуров.

Безусловно, данная зависимость нуждается в уточнении на основании дополнительных экспериментальных данных. Однако уже сейчас обозначенная на рис. 9 зона наиболее выгодных чисел оборотов может быть рекомендована для практического применения, при проектировании бурильных машин вращательного действия, а также при выборе экономически выгодных режимов бурения серийно выпускаемыми сверлами.

В первом приближении зависимость средней величины оптималь-

Скорость вращения бура оказывает существенное влияние и на энергоемкость процесса разрушения. Минимум энергоемкости соответствует максимуму скорости бурения для данной горной породы и данного усилия подачи и критическому числу оборотов бура. Как увеличение, так и уменьшение числа оборотов по сравнению с оптимальным значением приводит к увеличению энергозатрат. С увеличением механической прочности горных пород минимум энергозатрат соответствует меньшему по абсолютной величине числу оборотов.

Используя рекомендации исследователей [7, 9, 11, 12, 18, 19, 22], можно проследить зависимость критических чисел оборотов от крепости буримых горных пород. В табл. 3 приведены числа оборотов инструмента в минуту, рекомендованные различными исследователями для бурения различных горных пород как наиболее выгодные с точки зрения скоростей бурения и минимального износа инструмента. Эти данные

Таблица 3

Горная порода	f	Рекомендованные числа оборотов в минуту	Автор и ссылка на источник	Значение коэффициента C , об/мин
Глинистые сланцы	2—3	600—1000	А. Д. Имас [12]	1800—2000
Сланцы и мягкие песчаники	2	до 1500	И. Е. Рудавский [22]	3000
Сланцевый песчаник	4—5	600	Г. Н. Покровский [19]	2400—3000
Песчаник	4	425	А. Н. Волков [8]	1700
Немаркий боксит	4—5	700	В. Ф. Зинин и др. [11]	2800—3500
Алевролит	5	450	А. Н. Волков [8]	2250
„	6	385	В. К. Бучнев [6]	2300
„	6—8	300	„	1800—2400
„	8—10	200	„	1600—2000
„	10—12	116	„	1160—1400
Песчано-глинистый сланец	6	300—400	М. К. Цехин [25]	1800—2400
Песчаник мелкозернистый	8	300	„	2400
Известняк	8—10	345	В. Ф. Зинин и др. [11]	2700—3450
Мелкозернистый кварцевый песчаник	12	125	М. К. Цехин [25]	1500
Гранит	10—12	100—300	Г. П. Верескунов [7]	1200—3000
Породы средней крепости	6—10	150—400	О. Д. Алимов [3]	1500—2400
Гранит	15	50—70	В. Г. Михайлов [18]	750—1500
Порфиرويد-диабаз	12	125	В. Г. Михайлов [18]	1500
Полиметаллическая руда	6—8	210—286	В. Г. Михайлов [18]	1700

ного числа оборотов от крепости горной породы $n_{\text{онт}} = \varphi(f)$ может быть описана формулой

$$n_{\text{онт}} = \frac{C}{f}, \quad (6)$$

где C — постоянный коэффициент.

Если считать f безразмерным коэффициентом, то

$$C = \frac{n}{f} \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right].$$

Для указанных в табл. 3 условий величина C изменяется от 3500 до 1200 об/мин. В среднем, для расчетов, величина этого коэффициента может быть принята равной 2200 об/мин.

Таким образом, с некоторым приближением можно считать, что

$$n_{\text{онт}} = \frac{2200}{f}, \text{ об/мин.} \quad (7)$$

Оптимальные числа оборотов, вычисленные по формуле (7) (пунктирная линия на рис. 9), достаточно хорошо совпадают со средними

значениями рекомендуемых величин для горных пород с $f = 2 \div 10$. Для горных пород большей крепости расчетные величины оказываются несколько завышенными.

Энергоемкость вращательного бурения

Физико-механические свойства оказывают существенное влияние и на величину энергоемкости процесса разрушения. Экспериментально установлено [26], что объемная работа разрушения зависит линейно от прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и от твердости на вдавливание (рис. 10, а, б).

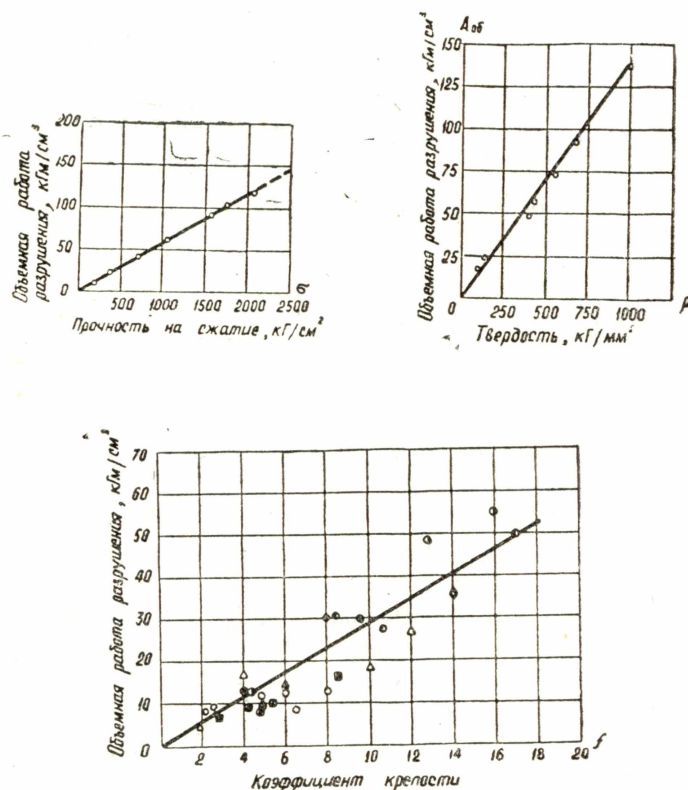


Рис. 10. Зависимость объемной работы разрушения от крепости горных пород.

Основываясь на этом, можно записать

$$A_{об} = \delta_1 \cdot \sigma_{сж}$$

или, зная, что $\sigma_{сж} = 100f$, получим

$$A_{об} = \delta \cdot f, \tag{8}$$

здесь δ_1 и δ — коэффициенты пропорциональности, $\delta = 100\delta_1$.

Под объемной работой разрушения в данном случае понимается минимально возможная ее величина, полученная при наиболее рациональных для данной горной породы режимах бурения.

Основываясь на этом и располагая многочисленными экспериментальными данными по выбору целесообразных режимов вращательного бурения шпуров [1—26] в различных горных породах, попытаемся отыскать значение коэффициента δ (8).

В табл. 4 сведены рекомендации различных исследователей по рациональным режимам бурения горных пород, различных как по механи-

Таблица 4

Горная порода	Коэффициент крепости, f	Параметры рациональных режимов бурения				Удельные энергозатраты, кгм/см^3	Автор и ссылка на источник
		число оборотов в минуту	усилие подачи, кг	скорость бурения, см/мин	потребляемая мощность, квт		
1	2	3	4	5	6	7	8
Уголь	до 2	800	55	107	1,3	5,45	Л. Д. Азарх, А. Д. Имас, О. П. Шумовский [1]
Гипс	1,8—2,2	800—1000	250	200	3,6	8,0	М. Г. Крапивин [6]
Каменная соль	2,6—3,4	1000—1200	200	700	до 10	6,5	"
Аргиллит углистый	2,5	300	500	132	2,7	9,2	М. К. Цехин [25]
Глинистый сланец	3—4	690	60	44	1,74	17,5	Ф. М. Гельфанд, Л. Д. Маркман [10]
Глинистый сланец	4,4	300	500	96	2,7	12,6	М. К. Цехин [25]
Глинистый сланец	4	1220	63	90	3,0	14,3	П. Н. Июдин [14]
Аргиллит песчаный	5	400	500	116,5	2,65	10,2	М. К. Цехин [25]
Алевриты	5	450	1000	200	3,5	8	А. Н. Волков [8]
Мелкозернистый песчаник	4—6	425	600	200	4,0	9	"
Известняк	5—6	917	20	60	1,4	10	П. Н. Июдин [14]
Песчаник глинистый	6	300	500	96	2,1	12,6	М. К. Цехин [25]
Песчаник	6—8	408	1000	260	4,8	8,3	О. Д. Алимов [2]
Сиениты	6—8	450	660	150		30,5	И. Ф. Медведев, М. Н. Смолянинов, В. Н. Тюрин [17]
Песчаник	$\approx 4—5$	580	800	251	5,15	9,23	Г. Н. Покровский [19]
Известняк	≈ 6	580	800	142	4,0	13,2	"
Среднезернистый песчаник	8	425	с 1100	130	3,5	12,1	А. Н. Волков [9]
Известняк	8	1220	63	50	6,0	51,5	П. Н. Июдин [14]

1	2	3	4	5	6	7	8
Песчано-глинистый сланец	8	200	800	40	2,7	30,3	М. К. Цехин [25]
Крепкие породы	8—9	297	—	86	3,0	15,7	В. Т. Сай [23]
Песчаник мелкозернистый	9,6	200	800	40	2,7	30,3	М. К. Цехин [25]
Известняк	10	450	600	67,5	2,8	18,7	И. Е. Рудавский [22]
Песчаник мелкозернистый	10,7	200	850	45,3	2,77	27,5	М. К. Цехин [25]
Тонкозернистый песчаник	8—14	274	830	50	2,9	26	А. Д. Имас, Л. Д. Азарх [13]
Мелкозернистый кварцевый песчаник	12,3	125	1000	25	2,7	48,5	М. К. Цехин [25]
Диорит	14—16	152	1500	10	1,24	55	О. Д. Алимов [2]
Гранит	12—14	110	800	13,3	1,038	36,7	Г. Н. Покровский [19]
Крепкий грубозернистый кварцевый песчаник	17	125	1100	21,4	2,38	50	М. К. Цехин [25]

ческой прочности (от $f = 1,8$ до $f = 17$), так и по минералогическому составу.

Минимальная удельная объемная работа разрушения для всех случаев была подсчитана нами по формуле

$$A_{об} = 6,12 \frac{N}{V S_{ш}}, \text{ кгм/см}^3 \quad (9)$$

где N — мощность, расходуемая на бурение, вт;

$S_{ш}$ — площадь сечения шпура, см^2 ;

V — скорость бурения, см/мин .

На основании табл. 4 на рис. 10, *в* нанесены результаты расчетов $A_{об}$ в зависимости от f . Несмотря на значительный разброс точек, можно с некоторым приближением представить зависимость между $A_{об}$ и f линейной.

Разброс данных, видимо, обусловлен рядом причин: неодинаковым подходом различных исследователей к определению мощности, расходуемой на бурение; несовершенством применяемой регистрирующей аппаратуры, а, главным образом, чрезвычайным непостоянством механических свойств буримых пород, даже при бурении одного шпура. Так, по данным Г. Н. Покровского [19], ошибки измерений основных параметров процесса бурения составляют 20—30% результата. Учитывая все это, мы считаем, что для практических расчетов можно воспользоваться зависимостью (8), приняв среднее значение коэффициента δ равным $2,8 \text{ кгм/см}^3$.

$$\text{Тогда } A_{об} = 2,8 f \quad (10)$$

(2,8 принято как среднеарифметическое из 29 значений δ , соответствующих горным породам и режимам бурения, указанным в табл. 4).

Средняя ошибка определения δ из данных табл. 1 $\pm 25\%$, то есть по величине соответствует ошибке измерения основных параметров бурения.

Зависимости объемной работы разрушения при бурении мрамора [2] от усилия подачи для различных по диаметру резцов представлены на рис. 11, *а*.

Из рис. 11, *а* видно, что характер изменения $A_{об} = f(P_{п})$ в обоих случаях одинаков, но в количественном выражении большему диаметру соответствует большая объемная работа разрушения. Причем с увеличением усилия подачи разница в значениях объемной работы уменьшается. Это, видимо, объясняется тем, что на периферии резца большего диаметра с увеличением усилия подачи образуется скол более крупных частиц.

На основании наших данных [2], свидетельствующих о том, что для сохранения постоянной скорости бурения с увеличением длины лезвия резца необходимо пропорционально увеличивать усилие подачи, и утверждения Г. Н. Покровского [19] о постоянстве величины стружки по диаметру резца, можно предположить, что энергоемкость процесса разрушения при прочих равных условиях прямо пропорциональна диаметру резца.

Значительное влияние на энергоемкость процесса разрушения оказывает геометрия бурового инструмента. Зависимость объемной работы разрушения [2] от величины углубления шпура за один оборот бура при бурении различными резцами (коронками) представлена на рис. 11, *б*. Коронка № 1 — обыкновенная однодолотчатая, предназначенная для ударно-поворотного бурения. Ее основная характеристика — отсутствие рассечки и передний отрицательный угол — 55° . Коронка № 2 — типа

РП-2 с передним углом 0° и с рассечкой. Коронка № 4 отличается от коронки № 2 наличием переднего отрицательного угла $\beta - 25^\circ$.

Наличие переднего отрицательного угла ведет к увеличению объемной работы разрушения (рис. 11, б). Применение коронки № 1 по срав-

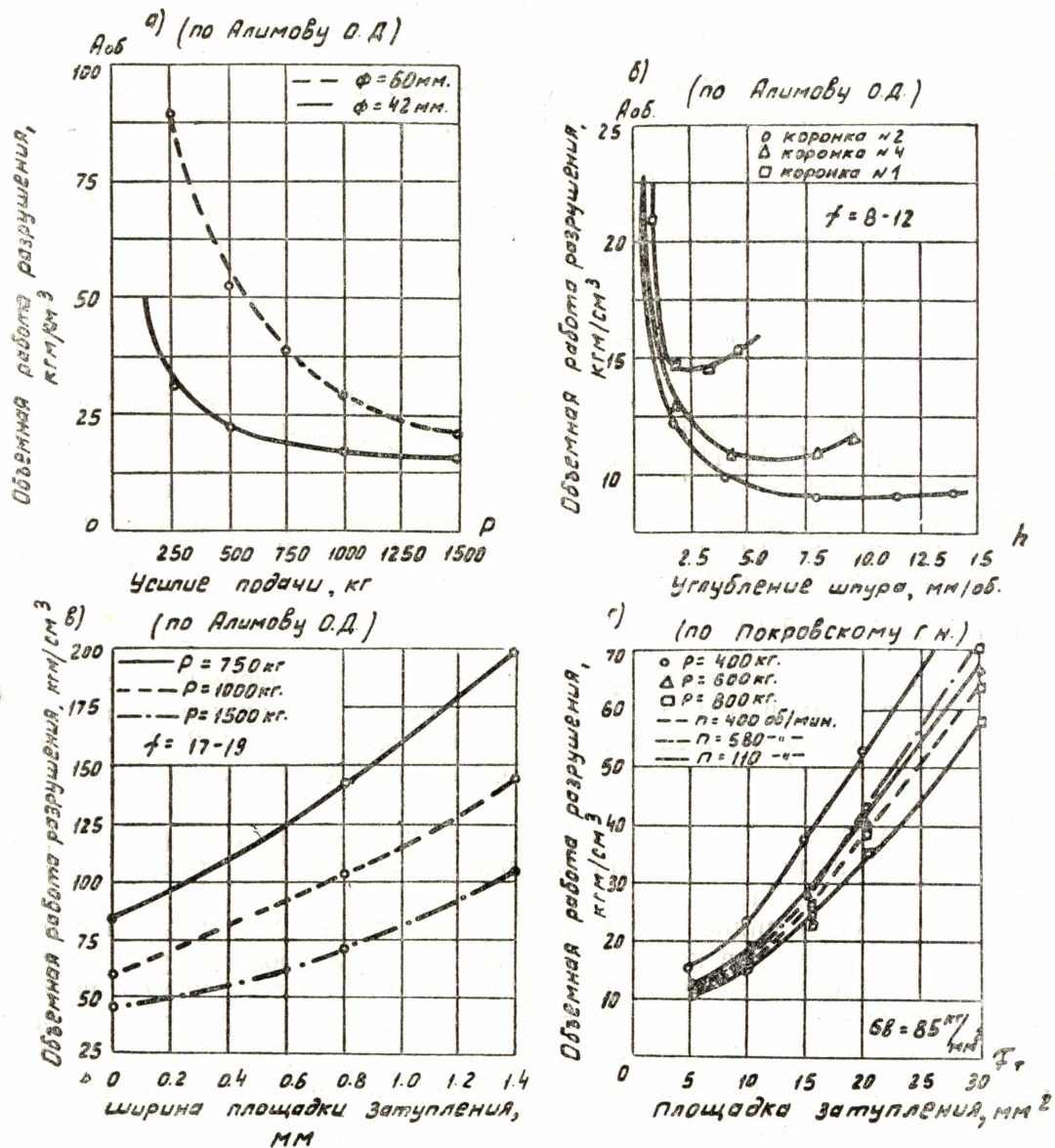


Рис. 11. Зависимость объемной работы разрушения от усилия подачи (а), углубления шпура за оборот (б) и от степени износа резьбы (в) и (г).

нению с коронкой № 2 увеличивает объемную работу разрушения в 3 раза. С точки зрения достижения минимальной объемной работы разрушения крайне выгодно уменьшение угла заточки резца. Но это может быть осуществлено лишь применением прочного материала для армирования резцов. Большое значение на энергоемкость разрушения оказывает и затупление резца, причем последнее происходит тем более интенсивно, чем меньше угол заточки.

Геометрия резца должна обеспечивать ему максимальную стойкость при минимальных энергозатратах на разрушение. Поэтому получившая в последнее время распространение тенденция создания резцов для вра-

щательного бурения с отрицательным передним углом в пределах (-5°) ÷ (-15°) является бесспорно правильной.

Влияние затупления резца на энергоемкость разрушения показано на рис. 11, в, г, по нашим [2] и Г. Н. Покровского [19] данным.

С увеличением усилия подачи как и с уменьшением скорости вращения бура интенсивность увеличения объемной работы разрушения от затупления падает. Это, видимо, объясняется влиянием масштабного фактора. Отсюда может быть сделан вывод, что до некоторого разумного предела выгодно использовать затупленный резец при применении значительных усилий подачи.

Мощность бурильных машин

Мощности машин, необходимые для бурения горных пород различной крепости, можно определить по формуле (9), если известны величины энергоемкости процесса разрушения.

Для рационального режима бурения, когда используется оптимальное число оборотов бура, в формуле (9) $A_{об}$ может быть заменено на $A_{об\ min}$, но так как $A_{об\ min} = 2,8f$, то, подставляя это выражение в (1), получим

$$2,8f = 6,12 \frac{N}{S_{ш} \cdot V}$$

или

$$N = 0,465 \cdot S_{ш} \cdot V \cdot f.$$

При определении мощности двигателя сверла $N_{дв}$ необходимо учитывать коэффициент его полезного действия η , тогда

$$N_{дв} = \frac{0,465 \cdot S_{ш} \cdot V \cdot f}{\eta}. \quad (11)$$

Если $S_{ш}$ принять постоянной, то $(0,465 \cdot S_{ш})$ в (11) можно обозначить коэффициентом A , тогда

$$N_{дв} = \frac{A \cdot V \cdot f}{\eta}. \quad (12)$$

Подставляя в выражение (12) скорость V , согласно формуле (1), получим

$$N = \frac{A \cdot \kappa (P_{п} - P_0) \cdot f}{10\eta}. \quad (13)$$

Мощность двигателя сверл в основном определяется максимально допустимыми усилиями подачи и крепостью пород. В этом случае в формуле (13) $P_{п}$ следует заменить на $P_{п\ max}$, тогда

$$N_{необх} = \frac{A \cdot \kappa \cdot (P_{п\ max} - P_0) \cdot f}{10 \cdot \eta}. \quad (14)$$

При создании универсальных сверл, предназначенных для бурения всего диапазона горных пород по крепости от 2 до $f = 12$, следует, видимо, брать за $P_{п\ max}$ его значение для наиболее крепких пород.

Размерность постоянного коэффициента A из $A = 0,465 S_{ш} \frac{вт \cdot мин}{см}$, то есть размерность объемной работы разрушения единицы длины шпура.

Поэтому коэффициент A может быть назван объемной работой разрушения единицы длины шпура при бурении горных пород с коэффициентом крепости равным единице.

Для стандартных резцов типа РП-2, РП-7 диаметром 42 мм

$$A = 0,465 \frac{\pi \cdot 4,2^2}{4} = 6,45 \frac{\text{вт} \cdot \text{мин}}{\text{см}},$$

тогда

$$N_{\text{дв}} = 0,645 \frac{\kappa \cdot f (P_{\text{п max}} - P_0)}{\eta}, \text{ вт} \quad (15)$$

Этой формулой можно пользоваться при расчете мощности двигателей сверл для различных горнотехнических условий.

В табл. 5 сведены данные различных исследователей о скорости бурения различных горных пород и необходимой для этого мощности.

Таблица 5

Горные породы	Коэффициент крепости, f	Скорость бурения, мм/мин	Потребляемая мощность, квт	Автор и ссылка на источник
Глинистый сланец	4	450	1,8	В. Г. Родионов [21]
	4	429	1,5	В. Г. Михайлов [18]
	4	820	2,4	В. К. Бучнев [6]
Аргиллит углист.	2—3	1300/1750	2,4/3,0	М. К. Цехин [25]
Глинистый сланец	4	950/1300	2,4/3,0	"
Песчаник	4	1300	3	А. Н. Волков [8]
Алеврит	5	1300	3	"
Аргиллит песчаный	6	950/1300	2,4/3,0	М. К. Цехин [25]
Сильно трещиноватый глинистый песчаник	6	450	2,4	В. К. Бучнев [6]
Песчаник	6	286	1,5	В. Г. Михайлов [18]
"	≈4—5	2260	3,96	Г. Н. Покровский [19]
"	6	300	1,8	Г. В. Родионов [21]
Крепкий песчаник	6	370	2,4	В. К. Бучнев [6]
Среднезернистый песчаник	8	1350	2,6	А. Д. Имас [12]
Известняк	≈6	1180	3,07	Г. Н. Покровский [19]
Песчаник	8	250	1,8	Г. В. Родионов [21]
"	8	1300	3,0	А. Н. Волков [8]
Тонкозернистый песчаник	8—10	500	2,85	А. Д. Имас [12]
Песчаник мелкозернистый	10	400/600	2,4/3,0	М. К. Цехин [25]
Известняк	10	180	2,4	В. К. Бучнев [6]
Песчаник весьма крепкий	12	180	2,4	В. К. Бучнев [6]
Мелкозернистый кварцевый песчаник	12	250/400	2,4/3,0	М. К. Цехин [25]
Диабаз	12	144	1,5	В. Г. Михайлов [18]
Порфирид	12	125	1,5	"
"	12	65—78	2,4	Г. П. Верескунов [7]
"	8—12	1200	4,0	О. Д. Алимов [2]
Грубозернистый песчаник	14	110/180	2,4/3,0	М. К. Цехин [25]

На основании этих данных построены зависимости скорости бурения от коэффициента крепости горных пород (рис. 12). Каждая кривая на рис. 12 соответствует определенной мощности, потребляемой двигателем сверла. С увеличением крепости пород скорость бурения резко уменьшается. Она в значительной степени зависит и от мощности двигателя, особенно для пород с коэффициентом крепости менее $f=10-12$. Для горных пород с $f=14$ увеличение мощности двигателя увеличивает скорость бурения в меньшей степени. Выводы многих исследователей, что при существующем буровом инструменте целесообразный диапазон применения вращательного бурения ограничивается крепостью горных пород $f=14$, хорошо иллюстрируются рис. 12. Скорости бурения пород с $f=14$ можно существенно увеличить, если во всех случаях осуществлять бурение с усилиями подачи порядка 1200 кг.

Для указанных предельных усилий подачи, пользуясь формулой (1), можно подсчитать максимально возможные скорости бурения различных горных пород. Результаты таких расчетов приведены в табл. 6.

На основании данных табл. 6 на рис. 13 построена кривая 1, показывающая предел возможных скоростей бурения с учетом стойкости применяемых буровых резцов.

Ранее было показано, что усилие подачи целесообразно увеличивать лишь до тех пор, пока резец не касается своей задней гранью

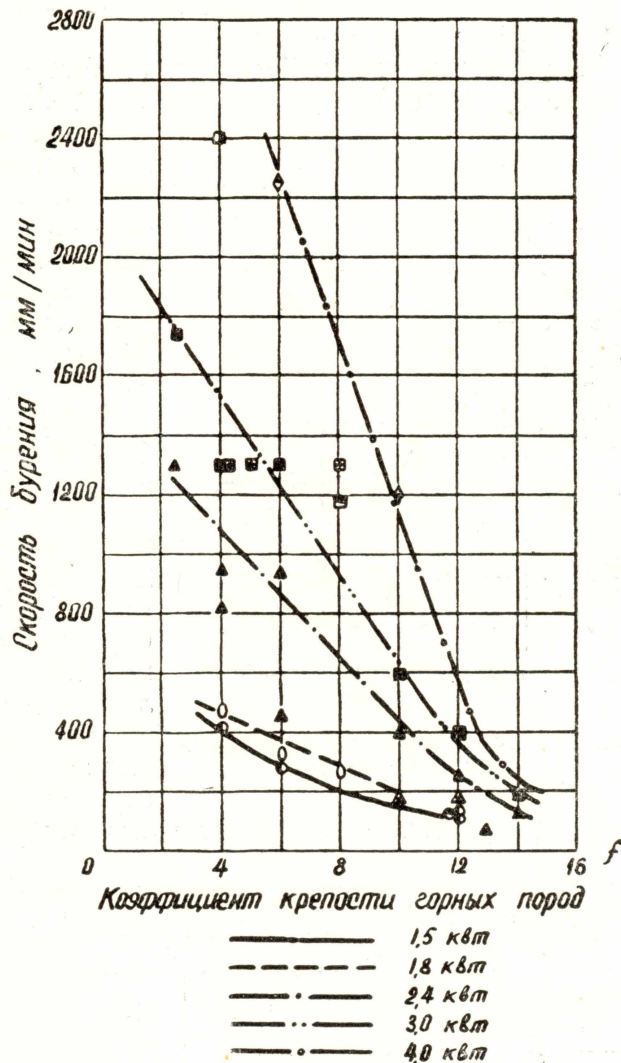


Рис. 12. Зависимости скорости бурения от крепости горных пород при различных мощностях, расходуемых на бурение.

Таблица 6

Коэффициент крепости горных пород, f	2	4	6	8	10	12
κ	7	4,2	2,1	1,5	1,0	0,7
P_0	70	140	210	280	350	420
Максимальная скорость бурения при $P_n = 1200$ кг, мм/мин	8000	4450	2080	1380	850	550

забоя шпура. Зная установленные из этого условия максимальные величины подачи на один оборот бура h_{\max} и оптимальные числа оборотов бура $n_{\text{опт}}$ можно подсчитать для различных горных пород максимально допустимые скорости бурения с точки зрения нормальной работы резца, то есть без касания задней гранью забоя. Результаты таких подсчетов приведены в табл. 7.

По данным табл. 7 на рис. 13 построена кривая 2. Сопоставляя кривые 1 и 2, можно установить, что для горных пород с коэффициентом крепости до $f=6$ максимально возможные скорости бурения ограничиваются геометрией инструмента, то есть дальнейшее повышение скоростей бурения путем увеличения усилия подачи приводит к касанию задней гранью резца забоя со всеми вытекающими последствиями. Отсюда, для таких горных пород целесообразно применять резцы с большим задним углом (с меньшим углом заточки γ), чем у резцов РП.

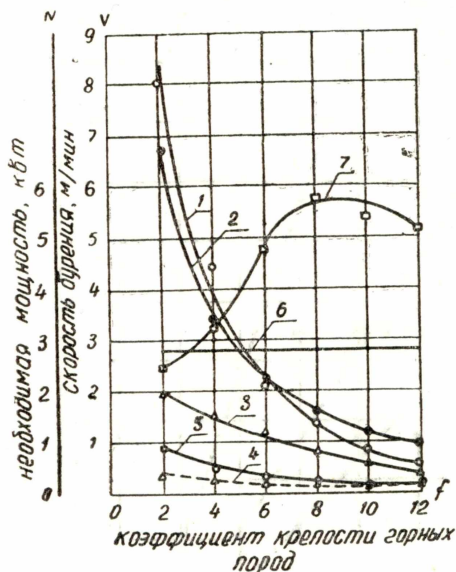


Рис. 13. Ограничения максимальных скоростей бурения.

Для горных пород с $f > 6$ предел возможных скоростей бурения определяется прочностью бурового инструмента. В этих случаях (особенно при бурении горных пород $f > 10$), видимо, целесообразно увеличить прочность лезвий и таким образом увеличивать и скорость бурения за счет уменьшения заднего угла и создания переднего отрицательного угла. Это и подтверждается результатами экспериментальных работ [18].

Таблица 7

Коэффициент крепости горных пород	2	4	6	8	10	12
Оптимальное число оборотов, об/мин.	1100	550	370	260	200	150
Максимальная скорость бурения при $h_{\max} = 6,1$ мм	6700	3400	2250	1600	1200	920

Мы уже отмечали, что усилие подачи, геометрия инструмента создают лишь условия для разрушения горных пород с той или иной интенсивностью. Для осуществления же разрушения горной породы необходима определенная мощность, которая и передается буровому инструменту от двигателя бурильной машины. Мощность двигателя существующих бурильных машин во многих случаях существенно ограничивает скорости бурения. Действительно, мощность двигателей сверл, выпускаемых в настоящее время, не превышает 3 квт. Для создания усилия подачи расходуется весьма незначительная мощность [8]. Совместно с потерями в двигателе и редукторе в колонковых сверлах ее можно принять равной 0,3—0,5 квт. Тогда на создание крутящего момента приходится до 2,7 квт. Для ручных сверл эта величина меньше и составляет около 1 квт.

В табл. 8 представлены данные различных исследователей о величинах крутящих моментов, необходимых для бурения различных горных

Таблица 8

Горная порода и коэффициент крепости	Подача на оборот, мм/об	Крутящий момент, кгм	Автор и ссылка на источник
1	2	3	4
Аргиллит песчаный, $f = 4-5$	1,56	3,17	М. К. Цехин [25]
	2,3	4,25	
	2,8	5,0	
Мелкозернистый песчаник, $f = 4-5$	2,28	3,76	А. Н. Волков [8]
	2,9	4,4	
	5,95	6,1	
	8,0	7,4	
Песчаник, $f \approx 4$	0,67	2,45	Г. Н. Покровский [19]
	1,7	4,32	
	2,9	6,2	
	4,86	8,1	
Глинистый сланец, $f = 4$	1,0	3,5	В. Г. Михайлов [18]
Песчаник, $f = 6$	1,0	5,0	В. Г. Михайлов [18]
Известняк, $f \approx 6$	0,32	1,7	Г. Н. Покровский [19]
	0,85	3,25	
	1,52	4,8	
	2,54	6,4	
Песчаник мелкозернистый, $f = 8-10$	0,48	5,9	М. К. Цехин [25]
	1,46	7,8	
	2,00	9,8	
Среднезернистый песчаник, $f = 8$	0,89	4,1	А. Н. Волков [8]
	2,6	5,6	
	4,9	7,2	
Известняк, $f = 8-10$	0,94	3,72	В. Ф. Зинин и др. [11]
	1,78	7,58	
	2,28	12,5	
Песчаник, $f = 6-8$	5,6	8-12	О. Д. Алимов [2]
Известняк, $f = 10$	0,43	1,7	И. Е. Рудаковский [22]

1	2	3	4
Известняк, $f = 10$	0,95 1,9 3,2	3,2 4,0 11,3	И. Е. Рудаковский [22]
Гранит, $f = 12$	0,213 0,67 1,21	2,0 6,2 9,0	Г. Н. Покровский [19]
Порфиرويد, $f = 12$	1,0	12,0	В. Г. Михайлов [18]

пород при различных удельных подачах за один оборот. По этим данным нами на рис. 14 построены зависимости $M_{кр} = \varphi$ для одинаковых удельных подач за оборот.

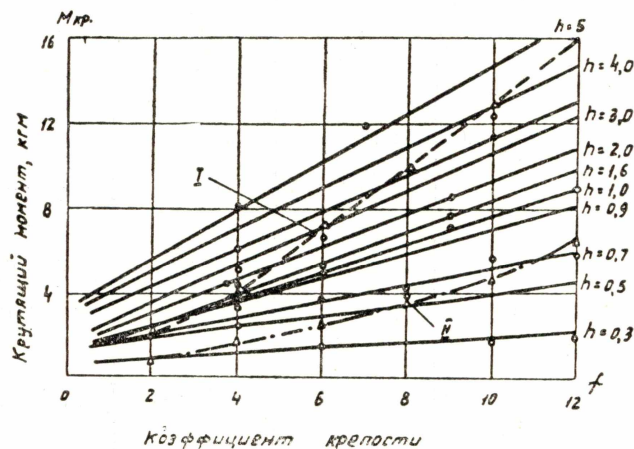


Рис. 14.

Учитывая величины мощностей двигателей современных колонковых и ручных сверл N и рекомендованные выше оптимальные числа оборотов, можно подсчитать крутящие моменты, которые могут быть развиты этими сверлами при бурении различных горных пород. Результаты таких расчетов представлены в табл. 9.

Таблица 9

Коэффициент крепости, f	2	4	6	8	10	12	
Колонковые сверла (мощность на вращение 2,7 квт)	$n_{опт}$, об/мин	1100	550	370	260	200	150
	$M_{кр\max}$, кгм	2,4	4,8	8,1	10,0	13,0	17,0
Ручные сверла (мощность на вращение 1,0 квт)	$n_{опт}$, об/мин	1100	550	370	260	200	150
	$M_{кр\max}$, кгм	0,90	1,76	2,60	3,75	4,90	6,50

По данным табл. 9 на рис. 14 нанесены линии I и II, определяющие возможные подачи на каждый оборот бура соответственно для сверл с мощностью вращения 2,7 квт и 1,0 квт. Эти линии в значительной степени ограничивают величины удельных подач, которые могут применяться при бурении различных горных пород без перегрузки двигателей сверл. На рис. 4 мы нанесли значения максимальных скоростей бурения, которые могут быть достигнуты существующими конструкциями сверл, имеющими двигатели мощностью 2,5—3 квт.

Таким образом, кривая *N—M* характеризует зону «потенциальных возможностей» существующих бурильных машин. При дальнейшем повышении мощности двигателей бурильных машин (и соответствующем увеличении усилий подачи) зона потенциальных возможностей расширится.

Используя данные рис. 14, можно с некоторым приближением отыскать максимально возможные значения удельных подач для различных по крепости горных пород, затем, зная оптимальные числа оборотов для этих пород, легко подсчитать максимально возможные скорости бурения, ограниченные мощностью двигателя. Вычисленные таким образом значения максимально допустимых удельных подач и соответствующих им скоростей бурения приведены в табл. 10.

Таблица 10

Коэффициент крепости горных пород, <i>f</i>	2	4	6	8	10	12
Максимально допустимая удельная подача для <i>N=2,7 квт, мм</i>	0,85	2,0	3,0	3,6	5,0	7,0
Максимальная скорость бурения для <i>N=2,7 квт, мм/мин</i>	940	1100	1100	940	1000	1050
Максимально допустимая удельная подача для <i>N=1,00 квт, мм</i>	0,3	0,4	0,45	0,5	0,60	0,75
Максимальная скорость бурения для <i>N=1,00 квт, мм/мин</i>	320	220	160	130	120	100

По этим данным на рис. 13 построены кривые 3 и 4. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что применяемые в настоящее время сверла с мощностью двигателей 2,7 квт для бурения горных пород с *f* до 8 не используют всех возможностей современного инструмента для увеличения скоростей бурения. Еще в большей степени это относится к ручным сверлам с мощностью привода 1 квт.

Для более полного использования возможностей инструмента, исходя из данных рис. 13, было бы целесообразно значительно увеличить мощность привода бурильных машин для бурения шпуров в горных породах крепостью до *f=8*.

Делая этот вывод, мы учитываем рекомендации различных авторов о резервах повышения удельной подачи, исходя из прочности инструмента (резцов).

Использование указанного выше резерва приведет к значительным удельным подачам, а следовательно, и к значительным крутящим моментам на буровом инструменте. Величины этих крутящих моментов в ряде случаев могут превысить допустимые по прочности инструмента. Поэтому рис. 13 следовало бы дополнить данными, ограничивающими скорости бурения, допустимыми крутящими моментами. К сожалению, такими данными мы не располагаем. Ограничения максимальных

скоростей бурения из условия удовлетворительного удаления из шпура буровой мелочи представлены кривыми 5 — при применении витых буровых штанг и 6 — при применении промывки.

Если учесть рекомендации о допустимых усилиях подачи, то, пользуясь формулой 15, можно определить мощности бурильных машин (табл. 11), которые в первом приближении могут быть рекомендованы как предельные для существующего бурового инструмента.

Таблица 11

Коэффициент крепости горных пород, f	2	4	6	8	10	12
Необходимая мощность двигателя с учетом к. п. д. сверла, <i>квт</i>	1,6	4,8	7,0	8,2	7,8	7,5
Необходимая мощность на бурение без учета к. п. д. сверла, <i>квт</i>	1,2	3,3	4,9	5,8	5,4	5,2

По данным табл. 11 на рис. 13 построена зависимость необходимой мощности на бурение (кривая 7) от крепости буримых пород.

Учитывая допустимые мощности сверл (рис. 13), оптимальные числа оборотов (рис. 8) и допустимые удельные подачи на оборот, можно определить возможные максимальные скорости бурения для различных горных пород.

Следует несколько слов сказать о мощности бурильных машин, предназначенных для бурения горных пород с $f=2$. В табл. 11 она составляет 1,2 *квт*. Такая мощность обеспечивает скорость бурения при оптимальных числах оборотов около 600 *мм/мин*.

Такая низкая максимально допустимая скорость бурения настораживает в отношении правильности определения необходимой мощности для бурения горных пород малой крепости (18). При выводе формулы (18) принят ряд приближений, одним из которых является определение P_0 как $35 f$. Для пород с $f=4$ и более величина P_0 , вычисленная по формуле (4), значительно меньше $P_{п\max}$, в то время как для $f=2$ они соизмеримы. Допускаемая при этом ошибка, видимо, сказывается весьма существенно и на определении допустимой мощности сверла и максимальной скорости бурения.

Для горных пород с $f=2$ по данным исследований [7] объемное разрушение наступает уже при усилиях подачи в 20—25 *кг*. Тогда, подставляя вместо $P_0=35 f$, $P_0=20$ *кг*, получим $N_{дв}=2,5$ *квт*; такой мощности двигателя сверла будет соответствовать скорость бурения до 2000 *мм/мин*.

Такие скорости бурения в породах с $f=2$ были достигнуты исследователями при применении ручных сверл с помощью двигателя 1 *квт*. Однако при этом наблюдались многократные перегрузки двигателя. Так, М. Г. Крапивин [16] указывает, что при бурении гипса с $f=1,8—2,2$ со скоростью 1,5—2,0 *м/мин* (число оборотов 1000 *об/мин*) двигатель сверла нагружается до 3,6—4,0 *квт*. Увеличение же мощности двигателей ручных сверл вряд ли целесообразно, так как значительно утяжелит сверла, фактически аннулирует их основное преимущество — высокую маневренность и превратит работу с такими сверлами в одну из наиболее тяжелых ручных работ. Поэтому мы считаем, что для ручных сверл скорости вращения бура следует ограничить 500—600 *об/мин*, мощности двигателей 1,2—1,4 *квт*, и применять эти машины следует только при небольшом объеме буровых работ. Для большого

объема буровых работ при разрушении горных пород даже малой крепости $f \approx 2$ следует создавать более мощные сверла со специальными устройствами для установки их в забое и подачи в процессе бурения. В этом случае целесообразно будет применять большие скорости вращения бура (порядка 1100 и более *об/мин*) и мощности двигателя порядка 2,0—2,5 *квт*. Несомненно, что более точно целесообразная мощность привода сверл должна быть установлена с учетом удобства эксплуатации машин той или иной конструкции, в тех или иных условиях. Эта задача может быть решена при исследовании конструкций бурильных машин и условий их применения.

Проведенный анализ основных параметров вращательного способа бурения шпуров с учетом экспериментальных данных многих исследователей позволяет нам рекомендовать, в первом приближении, рациональные режимы бурения различных по крепости горных пород (табл. 12).

Таблица 12

Параметры \ Коэффициент крепости f	Коэффициент крепости f					
	2—3	4—5	6—7	8—9	10—11	12
Оптимальные числа оборотов бура, <i>об/мин</i>	1100*) 700—1500	550 450—650	370 250—450	260 200—300	20 150—280	150 100—200
Усилие подачи при мощности двигателя сверла 2,7 <i>квт</i> , <i>кг</i>		250—300	400—400	600—700	700—800	800—900
Возможные скорости бурения при мощности двигателя 2,7 <i>квт</i> , <i>м/мин</i>		1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
Необходимые мощности двигателей сверл с точки зрения стойкости бурового инструмента, <i>квт</i>	2,5	4,8	7,0	8,2	7,8	7,5
Усилия подачи, соответствующие необходимым мощностям, <i>кг</i>	200—250	450—500	600—750	900—1000	1000—1200	1200—1400
Возможные скорости бурения при необходимых мощностях, <i>м/мин</i>		до 4,0			до 2,0	

*) В числителе среднее значение чисел оборотов бура, в знаменателе — оптимальная зона.

Режимы, приведенные в табл. 12, могут быть достигнуты при надежной очистке забоя шпура от буровой мелочи (промывкой, продувкой) и при использовании острых резцов. В настоящей работе вопрос износа резцов не рассматривался, но имеющиеся в литературе данные по этому вопросу нами изучены. Они позволяют заключить, что для всех горных пород с коэффициентом крепости в пределах $f = 2 \div 12$ работоспособность резцов (количество шпурометров, пробуренных до появления на лезвиях площадки затупления шириной в 3 *мм*) при рациональных режимах бурения составляет 2 и более погонных метров. Отсюда следует, что в таких условиях можно осуществлять бурение каждого шпура достаточно острым резцом и в процессе бурения шпура не потребуется время на смену инструмента.

Интенсивность удаления буровой мелочи из шпура в значительной степени влияет на скорость и энергоемкость бурения. В результате несвоевременной очистки забоя от продуктов разрушения они дополнительно измельчаются инструментом и буровой штангой, что приводит к дополнительному расходу мощности и снижению скорости бурения. Наиболее действенными способами очистки шпуров является продувка и промывка. По данным М. К. Цехина [25], А. Н. Волкова [9], применение промывки шпура водой для удаления буровой мелочи позволяет существенно увеличить скорость и уменьшить энергоемкость бурения, по сравнению с удалением буровой мелочи витыми штангами. М. К. Цехиним и А. Н. Волковым были зафиксированы случаи, когда применение интенсивной промывки позволило в 2 раза уменьшить энергоемкость бурения. Еще больший эффект может быть получен при удалении буровой мелочи из шпура сжатым воздухом [23]. Пока в практике предпочтение отдается промывке по той причине, что продувка без дополнительных устройств для улавливания буровой мелочи является вредной в гигиеническом отношении.

Дальнейшее увеличение скоростей бурения с одновременным уменьшением энергоемкости процесса разрушения может быть достигнуто лишь при условии радикального решения вопроса об интенсивном удалении буровой мелочи из шпура. Для этого необходимо одновременно с дальнейшим совершенствованием способов удаления буровой мелочи промывкой шпура водой совершенствовать и разрабатывать такие способы как продувка шпура сжатым воздухом и воздушно-водяной смесью, а также способа отсоса воздуха с буровой мелочью из шпура.

Выводы

1. Значительное количество экспериментальных данных по исследованию вращательного способа бурения шпуров дает возможность провести некоторые обобщения с целью выявления зависимостей между основными параметрами процесса бурения через эмпирические коэффициенты.

Выявленные таким образом зависимости между скоростью бурения V , усилием подачи P_n , числом оборотов бура n , коэффициентом крепости горных пород f , объемной работой разрушения $A_{об}$ и мощностью двигателя сверла $N_{дв}$ дают возможность с достаточной степенью точности производить расчеты по режимам бурения.

2. Уточнение эмпирических коэффициентов, выявленных в настоящей работе, задача весьма актуальная и может быть решена постановкой специальных исследований.

3. Увеличение производительности бурильных машин вращательного действия может быть достигнуто применением рациональных режимов их работы, совершенствованием бурового инструмента и конструкций самих машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Азарх, А. Д. Имас, О. П. Шумовский. Определение режимов бурения ручными электросверлами. Углетехиздат, 1952.
2. О. Д. Алимов. Исследование процессов разрушения горных пород при бурении шпуров. Изд. Томского университета, 1960.
3. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, В. Ф. Горбунов, Д. Н. Маликов. Бурильные машины. Госгортехиздат, 1960.
4. О. Д. Алимов, Л. Т. Дворников. Длинноходовое электросверло с гидроподачей. Сб. «Совершенствование угольного производства», Кемерово, 1963.
5. О. Д. Алимов, Н. С. Колодяжный, В. Н. Карминский. О создании длинноходовых электросверл с механической подачей. Известия вузов, Горный журнал, № 2, 1963.

6. В. К. Бучнев. Буровзрывные работы. Углетехиздат, 1951.
7. Г. П. Верескунов. Исследование режимов вращательного бурения шпуров в крепких породах. Автореферат диссертации, Днепропетровск, 1955.
8. А. А. Волков. Исследование электропривода колонковых электросверл. Кандидатская диссертация. Харьков, 1955.
9. А. Н. Волков. Обоснование и выбор основных параметров бурильных машин по породе для шахт Прокопьевско-Киселевского района Кузбасса. Кандидатская диссертация, Прокопьевск, КузНИУИ, 1958.
10. Ф. М. Гельфанд, Л. Д. Маркман. Исследование чистой скорости бурения при электровращательном способе бурения шпуров. Научные труды КНИУИ, сб. 3, Углетехиздат, 1958.
11. В. Ф. Зимин, В. Ф. Боровков, Е. И. Солдатов. Вращательное бурение горных пород на бокситовых рудниках. Горный журнал, № 8, 1962.
12. А. Д. Имас. Работы по внедрению рациональных технологических режимов разрушения углей и боковых пород горными машинами. Сб. «Разрушение углей и пород», Углетехиздат, 1958.
13. А. Д. Имас, В. Л. Азарх. Определение режимов бурения горных пород. ЦИТИ, Углетехиздат, 1952.
14. П. Н. Июдин. Применение электросверл для бурения шпуров по породам. ЦИТИ-углестрой, Углетехиздат, 1957.
15. Н. С. Колодяжный. Исследование и создание длинноходовых электросверл. Кандидатская диссертация, Томск, 1963.
16. М. Г. Крапивин. О параметрах буровых самоходных агрегатов для бурения шпуров при подземной добыче каменной соли и гипса. Инф. письмо о совещании по вопросам разрушения горных пород 20—22 мая 1958 г., ИГД, Москва, 1959.
17. И. Ф. Медведев, М. Н. Смолянинов, В. И. Тюрин. Электросверла с гидравлической подачей ЭСГП-4. Сб. «Новое оборудование для бурения шпуров и скважин», ЦИТИ угля, 1960.
18. В. Г. Михайлов. Исследование сверления шпуров. Докторская диссертация, Томск, 1940.
19. Г. Н. Покровский. Исследование процесса разрушения горных пород при вращательном бурении шпуров с постоянным усилием подачи. Кандидатская диссертация. Новосибирск, 1954.
20. М. М. Протодьяконов. Материалы для урочного положения горных работ. М., Изд. ЦК Горнорабочих, 1926.
21. Г. В. Родионов. Колонковое электросверло ЭК-2. Горный журнал, № 3, 1938.
22. И. Е. Рудаевский. Установление рациональных границ применения электровращательного способа бурения шпуров при проведении горноразведочных выработок. Кандидатская диссертация, Москва, 1960.
23. В. Т. Сай. Опытное внедрение вращательного бурения шпуров с промывкой в Кузбассе. Новокузнецк, 1958.
24. В. С. Федоров. Научные основы режимов бурения. Гос. научн. техн. изд-во нефтяной и горной литературы, 1951.
25. М. К. Цехин. Исследование буровзрывных работ и повышение их эффективности при проведении горизонтальных выработок по породе на шахтах Прокопьевского рудника. Кандидатская диссертация, Томск, 1955.
26. Л. А. Шрейнер. Физические основы механики горных пород. Гостоптехиздат, 1950.