

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОГО БУРЕНИЯ

*О. Д. Алимов, И. Г. Ляпичев, Я. А. Серов*

### Методика исследования вращательно-ударного бурения

В настоящее время в технике бурения шпуров применяются в основном два способа бурения: вращательный (сверлами) и ударно-поворотный (бурильными молотками). Применение способа вращательного бурения наиболее эффективно в мягких породах. Он обеспечивает наибольшую скорость и наименьшую энергоемкость бурения. По конструкции и изготовлению машины вращательного бурения достаточно просты, а в эксплуатации долговечны. Благодаря этим преимуществам такие машины широко применяются в угольной и строительной промышленности. Ряд исследователей [1, 2, 3] утверждает, что вращательным способом при усилии подачи 800—1500 кг можно бурить даже крепкие породы со скоростями, обычными для ударно-поворотного способа бурения. Однако износ инструмента, армированного твердым сплавом, при этом в 20—30 раз выше, чем при ударно-поворотном бурении.

Ударно-поворотный способ применяется для бурения шпуров и скважин в горных породах средней и высокой крепости. Основное его преимущество перед вращательным — значительно меньший износ инструмента.

Наибольшее применение этот способ бурения получил в горнорудной промышленности.

Стремление объединить преимущества вращательного и ударного бурения в горных породах средней и высокой крепости привело к созданию машин для вращательно-ударного бурения. Сущность этого способа заключается в том, что буровой инструмент имеет непрерывное вращение и подается на забой с определенным усилием подачи. Кроме этого, по буровому инструменту дополнительно наносятся удары ударным узлом, установленным на той же машине. Впервые предложение о создании таких машин было сделано Е. Ф. Эпштейном [1].

Промышленное применение вращательно-ударный способ бурения получил в последнее время в ряде западно-европейских стран. По данным иностранной литературы машины вращательно-ударного бурения обеспечивают скорости бурения в 2—3 раза выше, чем электросверла и пневматические бурильные мо-

лотки. Отмечается, что экономически целесообразно применять машины вращательно-ударного бурения только при работе их на определенных для данных пород режимах бурения и применении специального инструмента. Достаточно обоснованных данных для выбора режимов бурения и бурового инструмента для таких машин в литературе [3—6] не приводится. Нет таких данных и в нашей практике, хотя проекты подобных машин уже разрабатываются. Поэтому возникла необходимость в проведении специальных исследований для определения наиболее целесообразных режимов вращательно-ударного бурения, конструкции бурового инструмента и параметров бурильной машины. Программа этих исследований должна включать бурение разнообразных горных пород на различных режимах. Причем горные породы должны выбираться наиболее характерные для тех горногеологических условий, в которых предполагается применение машин.

Основные факторы, влияющие на скорость вращательно-ударного бурения: усилие и характер подачи, число оборотов бура, частота и энергия ударов, конструкция бурового инструмента и способ удаления буровой мелочи из шпура, необходимо исследовать в широком диапазоне их изменения. Конструкция экспериментальной установки должна обеспечивать постоянство этих факторов при проведении каждого опыта, а измерительная аппаратура — позволять регистрировать величину мощности, потребляемой ударным узлом, податчиком и узлом для вращения бура, расход воздуха и воды, износ инструмента и другие параметры, необходимые для определения технической характеристики и режимов работы бурильной машины.

Для наиболее полной и объективной оценки преимуществ и недостатков способа вращательно-ударного бурения по сравнению с другими способами исследования целесообразно проводить как сравнительные испытания этих способов. Такие исследования необходимо проводить в лабораторных и производственных условиях.

Целью лабораторных исследований должно быть: изучение механизма разрушения при бурении, определение скорости и энергоемкости бурения при различных сочетаниях чисел оборотов бура, усилия подачи, энергии и частоты ударов, геометрии бурового инструмента.

Исследования в производственных условиях проводятся для определения износостойкости бурового инструмента при работе его на различных режимах, для выбора наиболее целесообразного способа удаления штыба. В результате производственных исследований окончательно уточняются рекомендации по режимам бурения, буровому инструменту и технической характеристике машины.

Ниже приводится описание экспериментальной установки, методика проведения опытов и результаты экспериментальных

исследований, проведенных кафедрой горных машин и рудничного транспорта Томского политехнического института с целью определения целесообразности применения вращательно-ударного бурения для условий проведения подготовительных работ в Кузбассе.

Для определения оптимальных режимов бурения применительно к условиям Кузбасса исследования проводились при бурении двух наиболее характерных горных пород. Горные породы были представлены песчаником крепостью по шкале проф. М. М. Протодьяконова  $f=6\div 8$  и  $f=8\div 12$ . Крепость горных пород определялась при раздавливании кубиков и по методу Шора. Бурение проводилось в лаборатории и на Степановском карьере близ г. Томска.

Учитывая рекомендации различных исследователей и различные условия применения бурильных машин ударно-вращательного способа, основные параметры режимов бурения изменялись в следующих диапазонах: усилие подачи от 0 до 1600 кг; число ударов от 1600 до 3000 в минуту; число оборотов бура: 196 и 408 в минуту; энергия удара от 3 до 5 кгм. Шпуры диаметром 42 мм бурились бурами длиной от 1 до 2,5 м. Удаление разрушенной породы из шпура осуществлялось промывкой или продувкой. Наиболее целесообразный напор и расход воды или воздуха для удаления буровой мелочи устанавливался опытным путем в процессе исследования.

Все режимы бурения испытывались при нескольких типах съемных буровых коронок, выбор которых для испытаний был сделан на основании следующих соображений. С некоторым приближением можно считать, что способ вращательно-ударного разрушения горных пород при бурении является производным от двух известных способов: вращательного и ударно-поворотного. На основании многолетнего опыта для этих способов разрушения выработан инструмент, который в основном удовлетворяет эксплуатационным требованиям. К требованиям для инструмента вращательного бурения относятся наименьший угол приострения лезвий резца при достаточной прочности и стойкости его против абразивного износа. Геометрия такого резца приведена на рис. 1, б. Угол приострения лезвий составляет  $\beta = 65^\circ$ . Для увеличения стойкости против абразивного износа резцы оснащены пластинками твердого сплава ВК-8.

Для инструмента при ударно-поворотном бурении на первый план выдвигается требование прочности лезвия при ударной нагрузке, а также относительно высокая стойкость против абразивного износа. Для этого угол заострения буровой коронки увеличивают до  $\beta=100\div 110^\circ$  (рис. 1, а). Коронка армируется пластинками твердого сплава с повышенным содержанием кобальта типа ВК-11, ВК-15.

По геометрии и качеству бурового инструмента для вращательно-ударного бурения достаточно обоснованных предложений

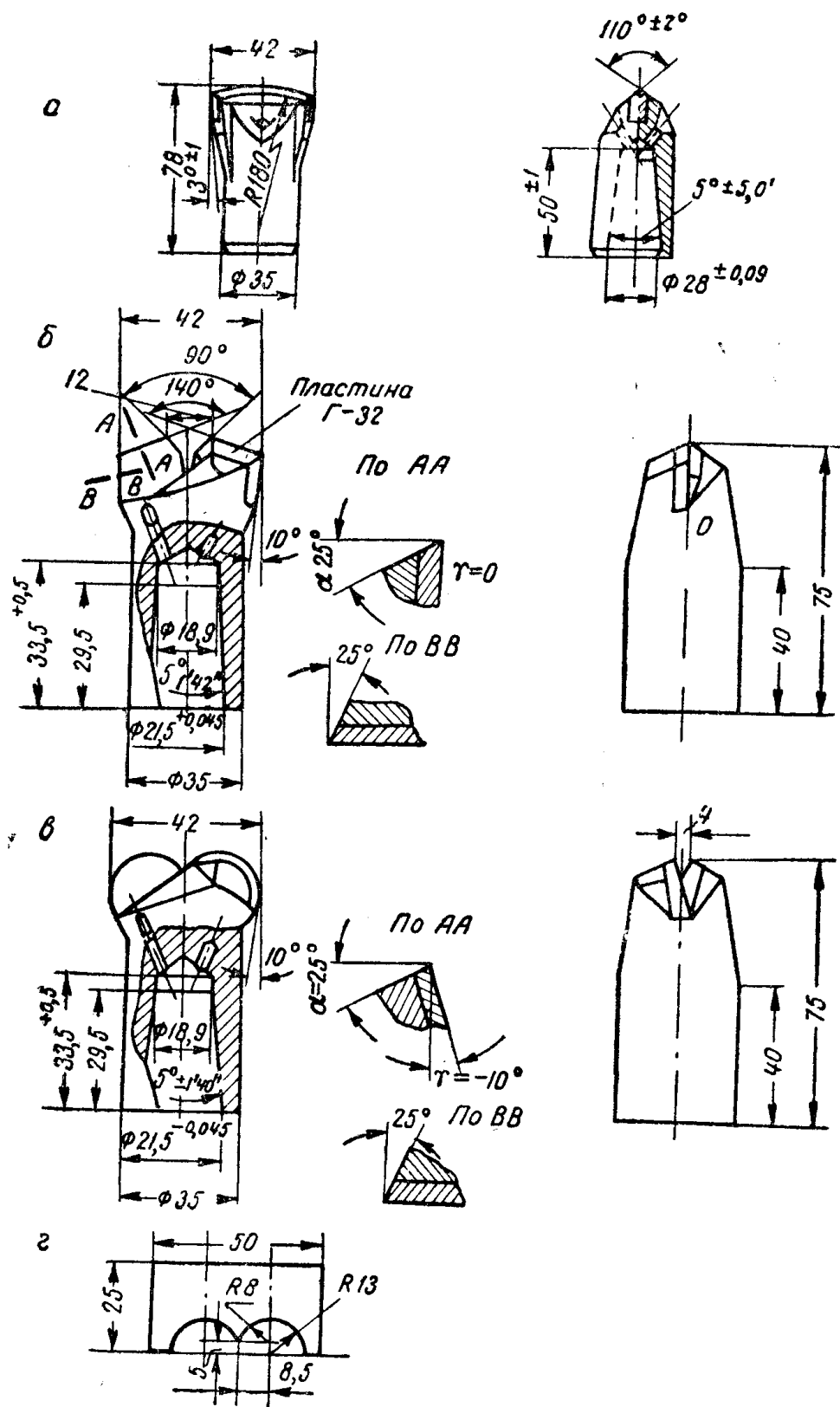


Рис. 1. Инструмент, испытанный при вращательном и вращательно-ударном бурении:

а — однофлюзовая коронка № 1; б — коронка № 3; в — коронка № 2; г — шаблон для контроля формы заточки коронки № 2.

пока нет. Резцы для вращательно-ударного бурения, видимо, должны удовлетворять тем и другим выше отмеченным требованиям.

Можно предполагать, что рациональная геометрия инструмента для этого способа бурения должна быть промежуточной между геометрией резцов для вращательного и ударно-поворотного бурения. В этом диапазоне может быть предложено большое количество разнообразных коронок с различной заточкой и формой лезвий, выполненных из различного материала.

Испытания большого количества коронок при бурении различных горных пород были бы очень трудоемкой и продолжительной работой без достаточной научной обоснованности и последовательности. Поэтому для решения поставленного вопроса о преимуществах вращательно-ударного бурения в первом приближении количество выбранных для испытания буровых коронок должно быть уменьшено до минимума. По нашему мнению, при сравнительных испытаниях вращательного, ударно-поворотного и вращательно-ударного бурения в первую очередь должны быть использованы коронки, широко применяемые для первых двух способов бурения (рис. 1, *а* и *б*). При бурении этими коронками на соответствующих им режимах будут получены основные параметры: скорость бурения и стойкость резца, характеризующие эти способы бурения. При испытании этих же коронок на режимах вращательно-ударного бурения будут выявлены предельные величины скорости и износостойкости в новых условиях эксплуатации. Эти данные позволяют в первом приближении решить вопрос о преимуществах того или иного способа разрушения, а также о конструкции бурового инструмента, предназначенного для вращательно-ударного бурения.

Созданный на основании этих рекомендаций буровой инструмент должен пройти дополнительные сравнительные испытания, результаты которых могут служить основанием для окончательного сравнения технико-экономических показателей различных способов бурения.

Исходя из этих соображений, для предварительных сравнительных испытаний авторами были приняты два типа коронок: однодолотчатая коронка, наиболее широко применяемая в настоящее время при ударно-поворотном бурении (коронка № 1) рис. 1, *а* и коронка вращательного бурения (коронка № 3), рис. 1, *б*, применяемая при бурении сверлами типа ПЭБ-2м. Геометрические параметры коронок № 1 и № 3 приведены в табл. 1. В этой же таблице приведены данные по коронке № 2, которая рекомендована на основании проведенных исследований для вращательно-ударного бурения горных пород средней крепости  $f = 6 \div 10$ .

Для проведения исследований различных режимов бурения была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, состоящая из станда с ударным, поворотным и подающим

Углы заточки режущего лезвия, град.			Диаметр коронки мм	Назначение и условное обозначение коронки
передний угол $\gamma$	задний угол $\alpha$	угол приострения $\beta$		
-55	35	110	41	Для ударно-поворотного бурения, односторонняя (коронка № 1)
-10	25	75	41	Для вращательно-ударного бурения (коронка № 2)
0	25	65	41	Для вращательного бурения (коронка № 3)

узлами, регистрирующих устройств, рамы для крепления стэнда и образцов породы, двух шахтных передвижных компрессоров ЗИФ-ШВКС-5 для получения сжатого воздуха и вентилятора «Прходка 500».

Принципиальная схема стэнда и приспособления для укрепления горной породы при проведении лабораторных исследова-

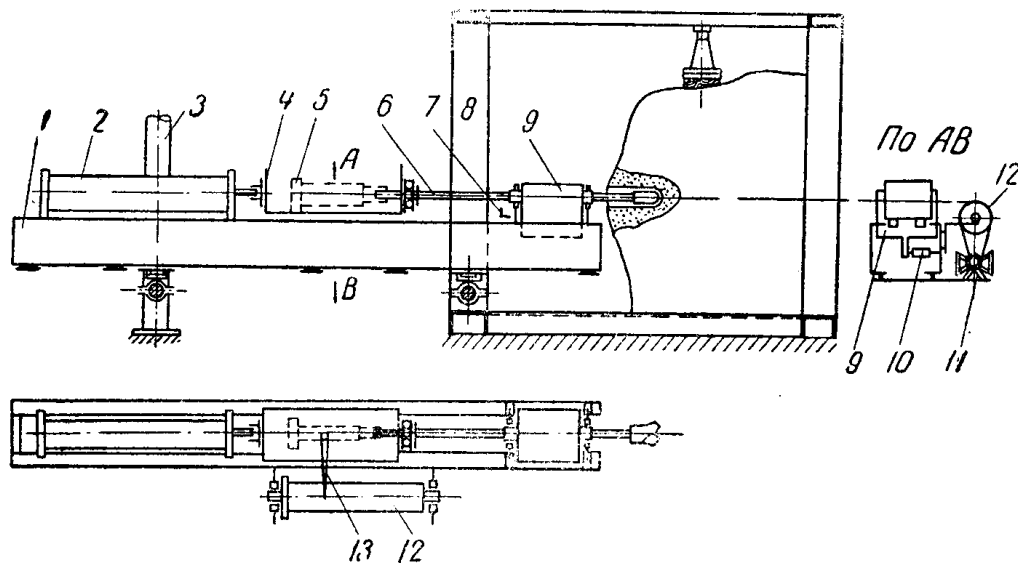


Рис. 2. Схема стэнда для исследования вращательно-ударного бурения.

ний показана на рис. 2. Стэнд состоит из рамы 1, поршневого пневматического податчика 2, ударного узла 5 и поворотного узла 9 с электрическим двигателем. Рама стэнда 1 (рис. 2, 3) выполнена из двух швеллеров. Задняя часть рамы опирается на кронштейн распорной стойки 3 (рис. 2) или подкладки (рис. 3). Передняя часть рамы стэнда укреплена с помощью обоймы на траверсе, закрепленной хомутами на стойках сварной рамы 8 (рис. 2). Конструкция обоймы позволяет поворачивать раму стэнда относительно вертикальной и горизонтальной оси траверсы. По направляющим рамы движется каретка 4 (рис. 2, 3) с

ударным механизмом 5. В качестве ударного механизма на каретке 4 может быть установлен любой пневматический бурильный молоток: от легкого типа РП-17 до тяжелого молотка КЦМ-4.

При проведении наших исследований в качестве ударного узла использовались молотки ОМ-506 и РН-754, у которых предварительно были вынуты собачки поворотного механизма. Технические характеристики молотков при давлении воздуха 4 и 6 *ати* приведены в табл. 2. В качестве подающего узла был при-

Таблица 2

Тип бурильного молотка	Вес молотка, кг	Диаметр поршня, мм	Ход поршня, мм	Число ударов в минуту при давлении		Энергия удара кгм при давлении		Мощность молотка, л. с. при давлении		Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин при 5 <i>ати</i>
				4 <i>ати</i>	6 <i>ати</i>	4 <i>ати</i>	6 <i>ати</i>	4 <i>ати</i>	5 <i>ати</i>	
ОМ-506	30	65	65	1600	1900	3,0	5,0	1,0	2,0	2,9
РН-754	23,6	75	44	2600	3000	3,0	4,6	1,7	3,0	3,1

нят поршневой пневматический податчик, который по сравнению с другими типами податчиков имеет ряд преимуществ: широкий диапазон изменения усилия подачи, простота регулировки усилия и постоянство его при проведении каждого опыта. Поршневой податчик 2 (рис. 2, 3) подает на забой каретку с необходимым усилием подачи. Каретка 4 передает усилие подачи на бур 6 через шарикоподшипник. Для ограничения движения каретки 4 в случае поломки бура 6 или выкола породы служит предохранительный упор 7 (рис. 2). Размеры поршневого податчика позволяли регулировать усилие подачи в пределах от 0 до 1600 кг (при давлении воздуха 6 *ати*). Давление воздуха, подводимого к податчику и молотку, регулируется дросселирующими вентилями и контролируется по манометрам.

В передней части рамы стенда 1 смонтирован механизм поворота бура 9 (рис. 2, 3), в качестве которого использовалось колонковое электросверло ЭБК-2. Сменные шестерни редуктора сверла позволяли изменять число оборотов бура, а асинхронный двигатель обеспечивал практически постоянное число оборотов бура при изменении крутящего момента. Корпус электросверла подвешен на шарикоподшипниках, ось которых совпадает с осью вращения бура. При передаче крутящего момента на бур корпус электросверла отклоняется в сторону, противоположную вращению бура. Этому перемещению препятствует моментомер, который фиксирует величину крутящего момента на буре. При проведении опытов применялись пружинный или гидравлический моментомеры.

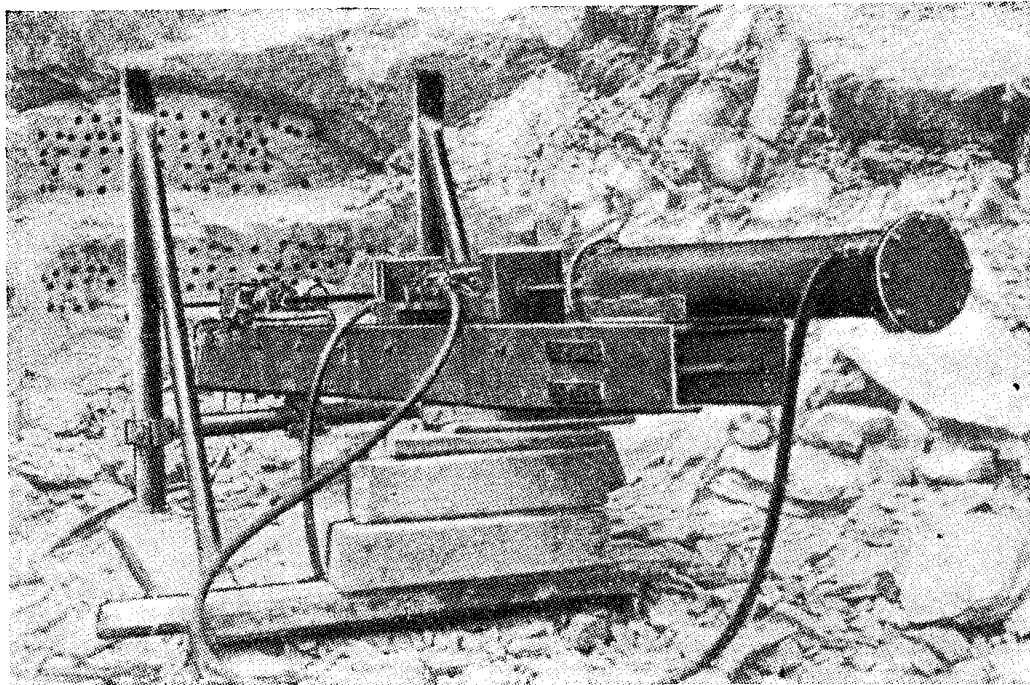


Рис. 3. Общий вид станда вращательно-ударного бурения.

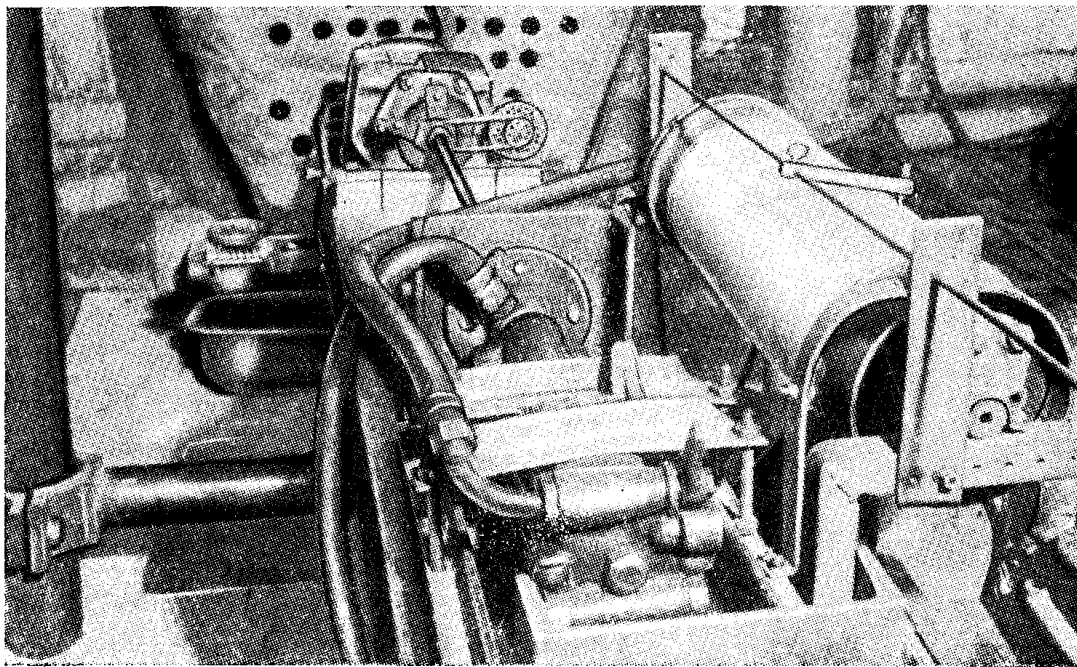


Рис. 4. Ударный узел станда вращательно-ударного бурения.



На каретке ударного узла крепится кронштейн 13 (рис. 2 и 4) с карандашом, который на вращающемся барабане 12 производит запись колебаний бурильного молотка и глубину шпура, пробуренного за опыт. Барабан 12 приводится в движение электросверлом 11.

Число оборотов бура за опыт фиксируется счетчиком оборотов типа УГН-1, а продолжительность опыта — секундомером. Мощность, потребляемая поворотным узлом, фиксируется самопишущим ваттметром, а расход воздуха — воздухомером.

Для бурения в лабораторию были доставлены образцы горных пород, размеры которых  $(1,5 \div 2 \times 1,0 \div 1,3 \times 1,0 \div 1,3 \text{ м})$  позволяли проводить достаточное количество опытов при бурении шпуров на глубину 0,7—0,8 м.

Горная порода, подвергаемая бурению, укрепляется в специальной раме домкратами. Удаление буровой мелочи из шпура при бурении в лабораторных условиях, как выяснилось при предварительных испытаниях, наиболее удобно и эффективно производить продувкой. Воздух для продувки подавался в шпур при помощи боковой муфты и отверстия в буре. Образующаяся при бурении и продувке шпура пыль отсасывалась вентилятором «Проходка 500». Для предохранения зубчатых колес поворотного механизма от засорения буровой мелочью внутрь корпуса редуктора также подавался воздух под давлением 1,5—2 *ати*.

#### Техническая характеристика стенда ТПИ для исследования вращательного и вращательно-ударного бурения

Диаметр цилиндра пневмоподачика, мм . . . . .	182
Усилие подачи при давлении 6 <i>ати</i> , кг . . . . .	1560
Часовая мощность двигателя вращения бура, квт . . . . .	2,7
Число оборотов бура в минуту . . . . .	50—408
Тип бурильного молотка, устанавливаемого в каретке: РП-17, ОМ-506, Т-10, РН-754, КЦМ-4, ПК-60	
Число ударов в минуту . . . . .	1600—3500
Энергия удара молотков, кгм . . . . .	3—8
Величина хода подачи, мм . . . . .	до 1000
Размер стенда:	
длина, мм . . . . .	5100
ширина, мм . . . . .	1350
высота, мм . . . . .	1800

#### Порядок проведения опытов и обработка экспериментальных данных

Перед началом проведения опытов осуществляется забуривание шпура на глубину 6—8 см вращательно-ударным способом при небольшом усилии подачи и давлении воздуха в молотке ударного узла около 3 *ати*. При проведении исследований вращательного бурения забуривание осуществлялось также вращательно-ударным способом, так как процесс забуривания при этом облегчался. Для определения глубины шпура, пробуренного за опыт, до начала опыта карандашом записывающего устрой-

ства стенда наносится начальная линия на бумаге, укрепленной на барабане. После этого одновременно включается двигатель вращения бура, бурильный молоток и секундомер. В конце опыта также одновременно выключается поворотный узел, молоток и секундомер, после чего наносится конечная линия. Расстояние между этими линиями равно глубине шпура, пробуренного за опыт. Каждый опыт проводился 3—4 раза при выбранном бурильном молотке и определенном давлении воздуха, подводимого к ударному узлу и податчику, числе оборотов бура и типоразмере инструмента.

Во время опыта замерялись следующие величины: давление воздуха в молотке; расход воздуха, потребляемого ударным узлом; продолжительность опыта; давление воздуха в цилиндре податчика; глубина шпура, пробуренного за опыт; число оборотов бура за опыт; сопротивление вращению бура, мощность, потребляемая поворотным механизмом.

Результаты замеров заносились в журнал наблюдений, где каждый опыт нумеровался. Эти же номера опытов указывались на диаграммах записи глубины шпура, мощности и момента.

По результатам наблюдений определялись следующие величины:

#### 1. Усилие подачи

$$P = pF - \Delta P \text{ кг};$$

где  $F$  — площадь поршня податчика,  $\text{см}^2$ ;

$p$  — давление воздуха в податчике,  $\text{ати}$ ;

$\Delta P$  — усилие на преодоление трения при перемещении поршня и каретки, определяется опытным путем.

#### 2. Скорость бурения

$$V = \frac{60S}{t} \text{ мм/мин},$$

где  $S$  — глубина шпура, пробуренного за опыт,  $\text{мм}$ ;

$t$  — время опыта,  $\text{сек}$ .

На основании экспериментальных данных строились графики зависимости скорости бурения от усилия подачи для всех способов бурения при использовании различного инструмента и способов удаления буровой мелочи. Такие зависимости позволяют представить влияние каждого из перечисленных выше факторов.

Для более полного представления о преимуществе вращательно-ударного бурения перед другими способами по скорости бурения строились графики зависимости приращения скорости бурения  $\Delta V$  от усилия подачи. Под приращением скорости бурения понимается превышение скорости вращательно-ударного бурения над скоростью бурения, обеспечиваемой другим способом

$$\Delta V = V_{\text{в.у}} - V_{\text{б}},$$

где  $V_{в.у}$  — скорость вращательно-ударного бурения;  
 $V_6$  — скорость вращательного или ударно-поворотного бурения.

Из двух последних для сравнения выбирался тот способ, который при бурении данного типа горных пород обеспечивал наибольшую скорость бурения. Например, при бурении горных пород крепостью до  $f \leq 10$  наиболее целесообразно сравнивать вращательно-ударное бурение и вращательное. Такие зависимости выявлялись для бурения различным инструментом при изменении числа оборотов бура и способов удаления буровой мелочи из шпура. В результате такой обработки экспериментальных данных возможно не только выявить преимущества одного способа перед другим по скорости бурения, но и определить диапазон наиболее целесообразных усилий подачи для вращательно-ударного бурения. Окончательные выводы об оптимальных усилиях подачи, числах оборотов бура, типе инструмента и способе удаления буровой мелочи можно сделать с учетом скорости бурения, энергоемкости и износостойкости бурового инструмента.

Для определения энергоемкости процесса разрушения при том или ином способе и режиме бурения определялись затраты мощности на вращение бура, подачу и ударный узел. Мощность на вращение бура определялась по формуле

$$N_{вр} = \frac{Mn_{об}}{97\ 600} \text{ кВт},$$

где  $M$  — момент на буре, определенный по моментомеру и тарировочному графику;

$n_{об}$  — число оборотов бура в минуту по счетчику оборотов, или по формуле

$$N_{вр} = \alpha_1 C \eta_1 \eta_2 \text{ кВт};$$

где  $\alpha_1$  — показания самопишущего ваттметра типа Д-351 мм;

$C$  — постоянная прибора (в нашем случае при наличии трансформатора тока УТТ-4,  $C = 90$ );

$\eta_1$  — к. п. д. двигателя, который определяется по нагрузочной характеристике;

$\eta_2$  — к. п. д. редуктора.

Мощность, передаваемая буру податчиком,

$$N_n = \frac{PV}{1000 \cdot 102 \cdot 60} \text{ кВт}.$$

Мощность, передаваемая буру ударами, принималась равной мощности молотка

$$N_m = \frac{An_{уд}}{102 \cdot 60} \text{ кВт},$$

где  $A$  — энергия удара, кгм;

$n_{уд}$  — число ударов в минуту, определяемое по данным предварительных испытаний.

Объемная работа разрушения определялась для каждого опыта по формуле

$$A_v = \frac{N_{вр} + N_{ш} + N_{м}}{F_{ш}V},$$

где  $F_{ш}$  — площадь шпура,  $см^2$ ;  
 $V$  — скорость бурения,  $см/мин$ .

По результатам расчета строились графики зависимости объемной работы разрушения от усилия подачи для различных чисел оборотов бура, типа инструмента и способа удаления буровой мелочи.

В связи с наличием ряда особенностей между бурением в лабораторных и производственных условиях опыты по определению скорости бурения и энергоемкости были повторены в производственных условиях. При этом выяснилось, что разница в условиях испытания не оказывает существенного влияния на полученные в лаборатории зависимости скорости бурения, энергоемкости и других параметров от усилия подачи. Однако в производственных условиях удалось более подробно изучить износостойкость коронки и влияние способа удаления буровой мелочи продувкой и промывкой на основные показатели процесса бурения.

Для определения этих зависимостей опыты проводились на карьере, где физико-механические свойства горных пород были характерными для шахт Кузбасса. Для проведения экспериментов использовалась та же установка и методика исследования, что и при лабораторных исследованиях. Шпуры бурились в массиве горной породы глубиной 2,5 м. Удаление буровой мелочи из шпура осуществлялось промывкой водой или продувкой воздухом. В каждом случае устанавливалось целесообразное давление и расход промывочной жидкости и воздуха, обеспечивающие полное удаление буровой мелочи из шпура.

Для выявления износостойкости инструмента при работе на различных режимах бурения определялось нарастание площадки затупления коронки в зависимости от количества пробуренных метров шпура и соответствующее изменение скорости бурения. Ширина площадки затупления измерялась с помощью лупы Бринеля с 24-кратным увеличением.

### Результаты исследования

При вращательном бурении песчаника крепостью  $f=8-12$  всеми типами испытанных коронок (рис. 5 и 6) с увеличением усилия подачи скорость бурения повышается. Причем, при усилиях подачи от 100 до 300 кг скорость изменяется незначительно. При дальнейшем увеличении усилия подачи скорость бурения увеличивается в большинстве случаев пропорционально увеличению усилия подачи. Характерное для вращательного бурения незначительное увеличение скорости бурения при малых усилиях по-

дачи (100—300 кг) можно объяснить тем, что в этом случае давление в месте контакта инструмента и горной породы недостаточно для объемного разрушения горной породы. С увеличением числа оборотов бура со 196 до 408 в минуту скорость вращательного бурения значительно возрастает.

При вращательно-ударном бурении песчаника крепостью  $f = 8 \div 12$  зависимость скорости бурения от усилия подачи выражается выпуклой кривой (рис. 5 и 6). В отличие от вращательного бурения наиболее интенсивное увеличение скорости бурения коронками № 2 и № 3 наблюдается при небольших усилиях подачи (100—700 кг). Это можно объяснить тем, что уже при малых усилиях подачи удары по буру обеспечивают внедрение резца в горную породу. Для последующего же эффективного разрушения забоя шпура скалыванием стружки за счет вращения бурового инструмента требуется уже меньшее осевое усилие, чем для первоначального внедрения.

При усилиях подачи свыше 700 — 1000 кг преимущество вращательно-ударного бурения над вращательным менее существенно. Видимо, в этом случае доля динамической нагрузки в создании необходимого удельного давления уже менее значительна и решающее значение для внедрения инструмента в горную породу имеет статическая нагрузка от постоянного усилия подачи. Однако увеличение скорости бурения от дополнительных ударов сохраняется и при значительных усилиях подачи. Отмечаемое некоторыми исследователями [6] уменьшение скорости вращательно-ударного способа бурения по сравнению с вращательным при усилиях подачи более 1000 кг нами не наблюдалось. При одном и том же усилии подачи скорость вращательно-ударного бурения коронками № 2 и 3 в 2—3 раза выше по сравнению с коронками № 1. Это можно объяснить тем, что для внедрения коронок № 1 в забой шпура на определенную глубину требуются значительно большие усилия

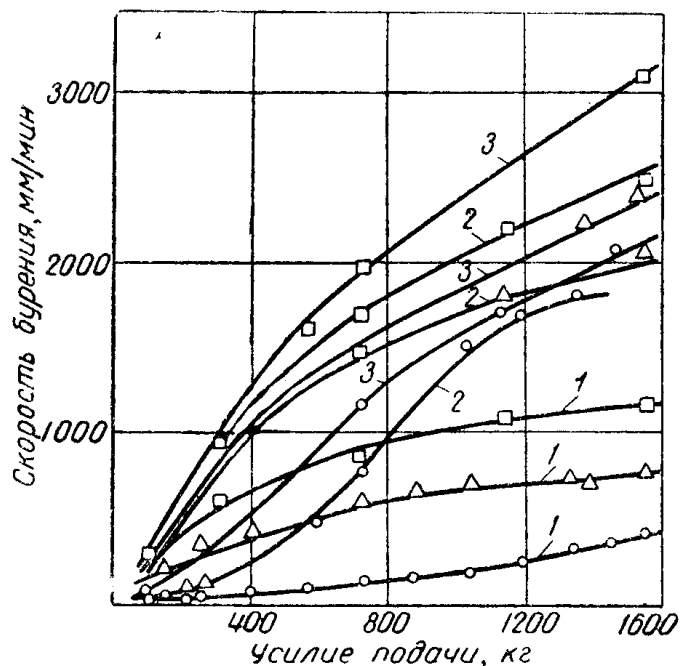


Рис. 5. Зависимость скорости бурения от усилия подачи: порода — песчаник  $f = 8 \div 12$ ; молоток ОМ-506; 1 — коронка № 1; 2 — коронка № 2; 3 — коронка № 3;  $n_b = 196$  об/мин;  $\circ$  — вращательное бурение; вращательно-ударное бурение;  $\triangle$  —  $p_m = 4$  атм;  $\square$  —  $p_m = 6$  атм.

по сравнению с коронками № 2 и 3. При увеличении числа оборотов бура со 196 до 408 в минуту скорость бурения песчаника (рис. 7) повышается при вращательном способе в 1,5—2 раза, а при вращательно-ударном — в 1,5—2,5 раза. Наибольшее приращение скорости бурения как для вращательного, так и для вращательно-ударного способов соответствует небольшому усилию подачи, когда аб-

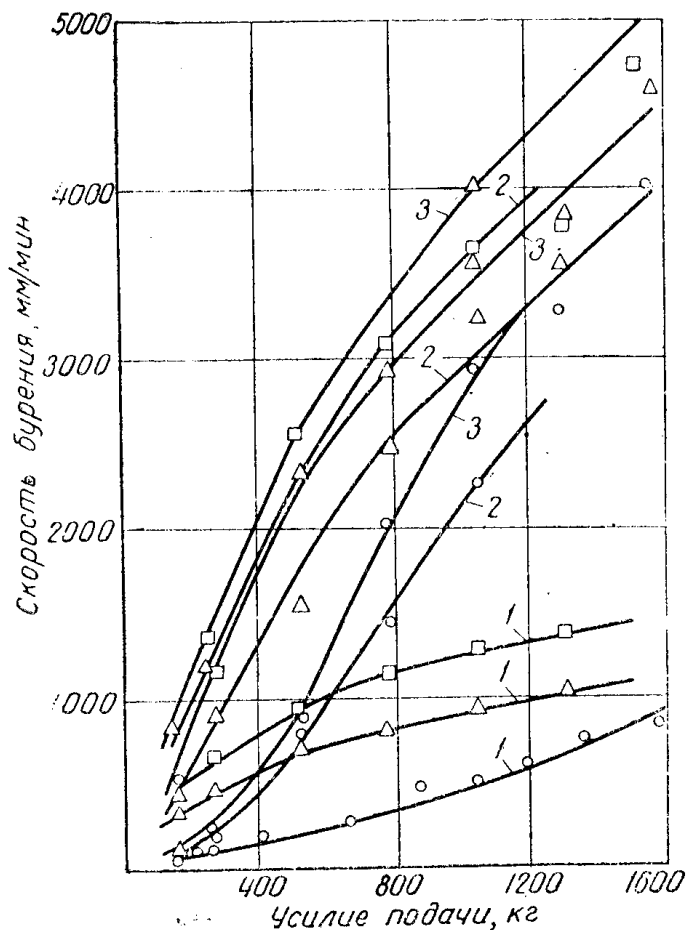


Рис. 6. Зависимость скорости бурения от усилия подачи:

порода — песчаник  $f=8 \pm 12$ ; молоток ОМ-506; 1 — коронка № 1; 2 — коронка № 2; 3 — коронка № 3;  $n_6 = 408$  об/мин;  $\circ$  — вращательное бурение;  $\Delta$  —  $p_M=4$  ати;  $\square$  —  $p_M=6$  ати.

ра 196 оборотов и 700—850 мм/мин при 408 оборотах в минуту. Из этого видно, что применение ударных узлов с повышенной частотой ударов особенно эффективно при больших скоростях вращения бура. Следует отметить, что режущие грани коронки № 3 ( $\gamma=0^\circ$ ), армированные твердым сплавом ВК-6, при применении в качестве ударных узлов машины молотков типа РН-754 быстро выходят из строя из-за поломок пластинок твердого сплава.

Приращение скорости вращательно-ударного бурения по сравнению с вращательным возрастает с увеличением усилия подачи (рис. 8), достигает максимума, а затем уменьшается. Прира-

лию подачи, когда абсолютные значения скоростей бурения невелики.

Увеличение давления воздуха, подводимого к ударному узлу, и вследствие этого увеличение числа ударов оказывает наибольшее влияние на скорость вращательно-ударного бурения во всех случаях при больших усилиях подачи.

Повышение числа ударов (применение в качестве ударного узла молотка РН-754 вместо ОМ-506) ведет к возрастанию скорости вращательно-ударного бурения (табл. 3 и 4). Причем абсолютное значение прироста скорости бурения, примерно одинаково для всех усилий подачи и составляет 450 — 500 мм/мин при скорости вращения бу-

Таблица 3

Тип молотка ударного узла	Скорость бурения, мм/мин при усилиях подачи, кг			
	300	500	1000	1500
OM-506	<u>850</u>	<u>1200</u>	<u>1750</u>	<u>2000</u>
	920	1340	2040	2450
RH-754	<u>1300</u>	<u>1650</u>	<u>2240</u>	<u>2500</u>
	1360	1800	2480	2900
Увеличение скоростей бурения за счет применения молотка RH-754 вместо молотка OM-506, мм/мин	<u>450</u>	<u>450</u>	<u>490</u>	<u>500</u>
	440	460	440	450
Увеличение скорости бурения, % (OM-506—100%)	<u>153</u>	<u>137</u>	<u>130</u>	<u>125</u>
	148	134	122	118

Примечание. Бурение производилось коронкой № 2 при 196 оборотах бура в минуту. В числителе даны показатели при давлении воздуха в молотке ударного узла 4 *ати*, в знаменателе — 6 *ати*.

Таблица 4

Тип молотка (ударного узла)	Скорость бурения, мм/мин при усилиях подачи, кг			
	300	500	900	1200
OM-506	<u>1400</u>	<u>2100</u>	<u>3200</u>	<u>3800</u>
	1600	2450	3600	4200
RH-754	<u>2200</u>	<u>2900</u>	<u>3900</u>	<u>4550</u>
	2450	3300	4300	4900
Увеличение скоростей бурения за счет применения молотка RH-754 вместо молотка OM-506	<u>800</u>	<u>800</u>	<u>700</u>	<u>750</u>
	850	850	700	700
Увеличение скорости бурения, % (OM-506—100%)	<u>157</u>	<u>138</u>	<u>122</u>	<u>120</u>
	153	135	120	117

Примечание. Бурение производилось коронкой № 3 при 408 оборотах бура в минуту. В числителе даны показатели при давлении воздуха в молотке ударного узла 4 *ати*, в знаменателе — 6 *ати*.

щение скорости бурения возрастает с увеличением скорости бурения за счет увеличения числа оборотов бура со 196 до 408 в минуту, использования в качестве ударного узла молотка RH-754 вместо молотка OM-506 и за счет изменения геометрии инструмента.

Максимальное приращение скорости при вращательно-ударном бурении коронками № 2 и 3 достигается при усилении подачи

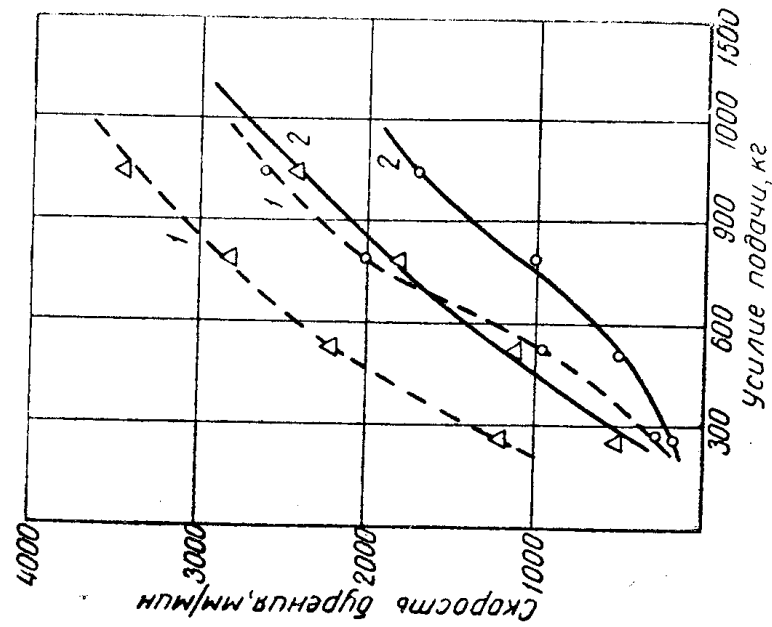


Рис. 7. Зависимость скорости бурения от усилия подачи и числа оборотов бура:  
 порода — песчаник  $f=6-8$ ; молоток РН-754; коронка № 2; удаление буровой мелочи промывкой; 1 —  $n_6=408$  об/мин; 2 —  $n_6=196$  об/мин; 3 — вращательное бурение;  $\Delta$  — вращательно-ударное бурение;  $P_M=4$  атм.

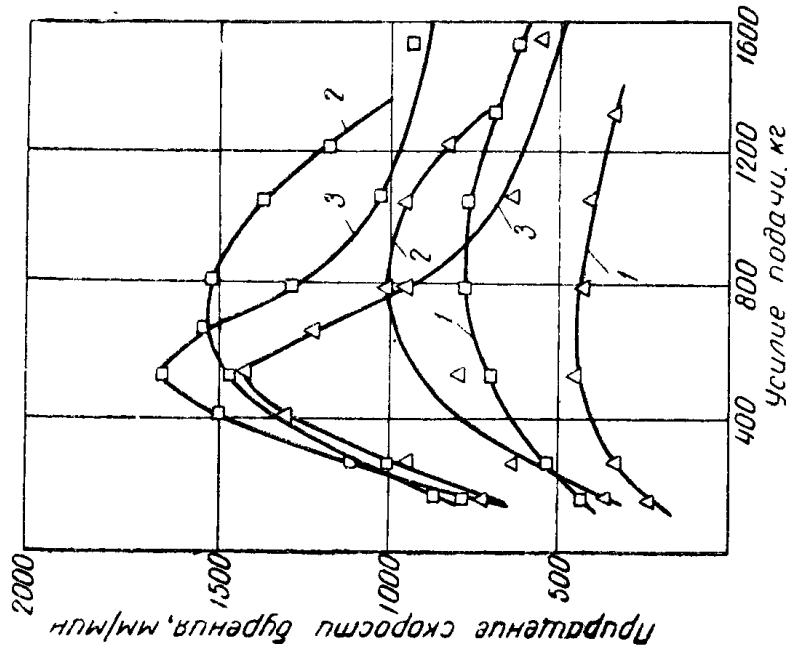


Рис. 8. Зависимость приращения скорости вращательно-ударного бурения от усилия подачи:  
 порода — песчаник  $f=8-12$ ; молоток ОМ-506; 1 — коронка № 1; 2 — коронка № 2; 3 — коронка № 3;  $n_6=408$  об/мин;  $\Delta$  —  $P_M=4$  атм;  $\square$  —  $P_M=6$  атм.



500—600 кг. Изменение приращения скорости бурения коронкой № 1 менее интенсивное, чем при бурении коронками № 2 и 3, но охватывает гораздо больший диапазон усилий подачи.

Наибольшее приращение скорости бурения коронкой № 1 происходит при усилиях подачи 1000—1200 кг, т. е. в 2 раза больше, чем при бурении коронками № 2 и 3. Это можно объяснить тем, что коронки № 2 и 3 имеют меньший угол приострения, а следовательно, меньшую площадь контакта с породой. В результате этого внедрение коронки № 2 и 3 в забой шпура осуществляется при значительно меньших усилиях, чем у коронки № 1. Абсолютные значения приращений скорости бурения коронками № 2 и 3 значительно выше, чем при бурении коронкой № 1.

При бурении песчаника ( $t = 8 \div 12$ ) для полного удаления буровой мелочи из шпура продувкой требовалось давление воздуха 3 *ати*. При этом расход воздуха составлял 0,5  $\text{м}^3/\text{мин}$ . Для полного удаления буровой мелочи при бурении песчаника  $t = 6 \div 8$  потребовалось увеличить давление воздуха, подаваемого на продувку шпура, до 4 *ати*, при этом расход воздуха составил 0,7  $\text{м}^3/\text{мин}$ .

Для полного удаления буровой мелочи из шпура промывкой при наибольших скоростях бурения требуется расход воды 14—15  $\text{л}/\text{мин}$ . Конструкция устройства для промывки экспериментальной установки обеспечивала этот расход при давлении воды 5 *ати*. Дальнейшее повышение давления подводимой воды не увеличивало скорости бурения.

Проведенные исследования позволили сравнить эффективность различных способов удаления буровой мелочи и установить влияние их на скорость вращательного и вращательно-ударного бурения. Как видно из рис. 9, при удалении буровой мелочи про-

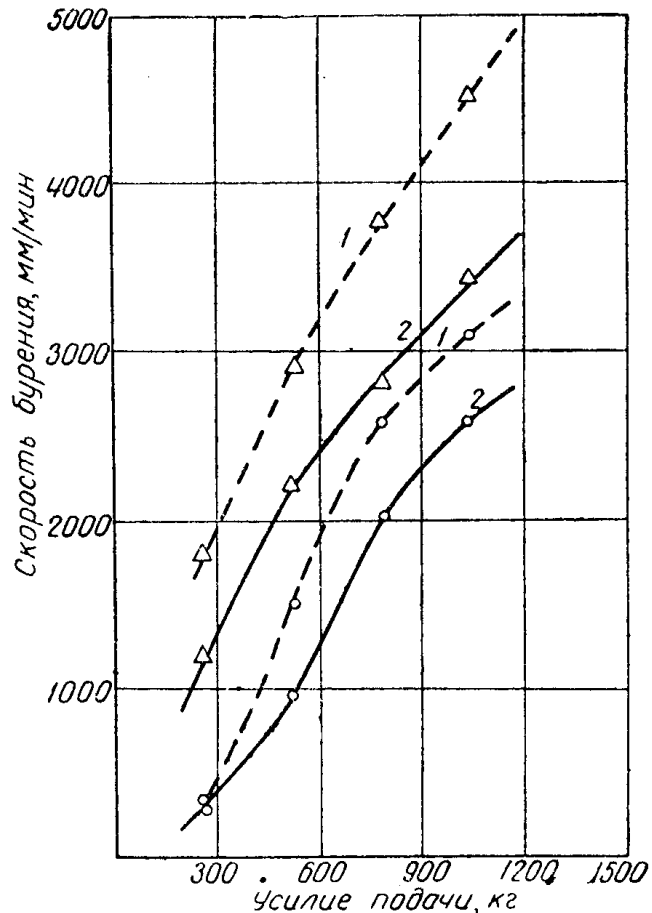


Рис. 9. Зависимость скорости бурения от усилия подачи и способа удаления буровой мелочи из шпура:

порода — песчаник  $f = 6 \div 8$ ; молоток RH-754; коронка № 2;  $n_0 = 408$  об/мин; 1 — бурение с продувкой; 2 — бурение с промывкой; о — вращательное бурение; Δ — вращательно-ударное бурение,  $p_M = 4$  *ати*

дувкой скорость вращательного бурения на 20—48% выше, чем при удалении буровой мелочи промывкой. Для вращательно-ударного бурения это увеличение составляет 32—49%. Широко распространенное мнение, что промывка по сравнению с другими способами увеличивает скорость вращательного бурения, нашими опытами не подтверждается. Видимо, продувка по сравнению с промывкой обеспечивает лучшее удаление буровой мелочи от режущих граней бурового инструмента и тем самым повышает скорость бурения.

Мощность, потребляемая двигателем вращения бура, непрерывно возрастает с увеличением усилия подачи (рис. 10 и 11).

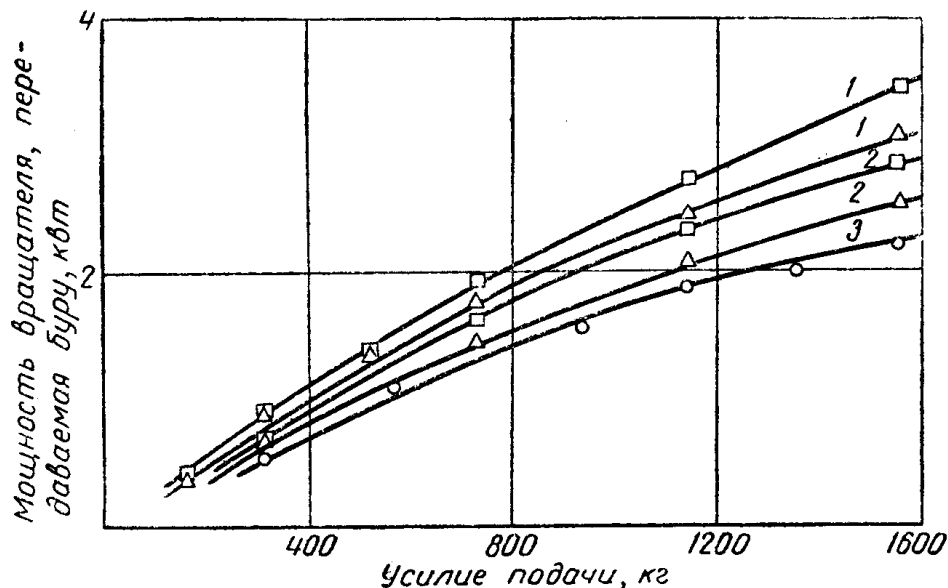


Рис. 10. Зависимость мощности вращателя, передаваемой буру, от усилия подачи:

порода — песчаник  $f=8 \pm 12$ ; молоток ударного узла ОМ-506; 1 — коронка № 1; 2 — коронка № 2; 3 — коронка № 3;  $n_б=196$  об/мин;  $\circ$  — вращательное бурение; вращательно-ударное бурение;  $\Delta$  —  $p_m=4$  атм;  $\square$  —  $p_m=6$  атм.

С увеличением давления воздуха, подводимого к молотку, с 4 до 6 атм потребляемая мощность вращателя изменяется незначительно. Во всех случаях для вращательно-ударного бурения требуется несколько большая мощность, чем для вращательного.

С увеличением числа оборотов бура со 196 до 408 в минуту мощность, потребляемая вращателем, возрастает примерно в 2 раза при всех режимах вращательно-ударного бурения. Увеличение числа ударов (применение в качестве ударного узла молотка РН-754 вместо ОМ-506) ведет к возрастанию потребляемой вращателем мощности примерно на 10—40%, причем наибольшее увеличение мощности вращателя в этом случае происходит при 196 оборотах бура в минуту.

Геометрия испытанного бурового инструмента не оказывает существенного влияния на величину потребляемой мощности.

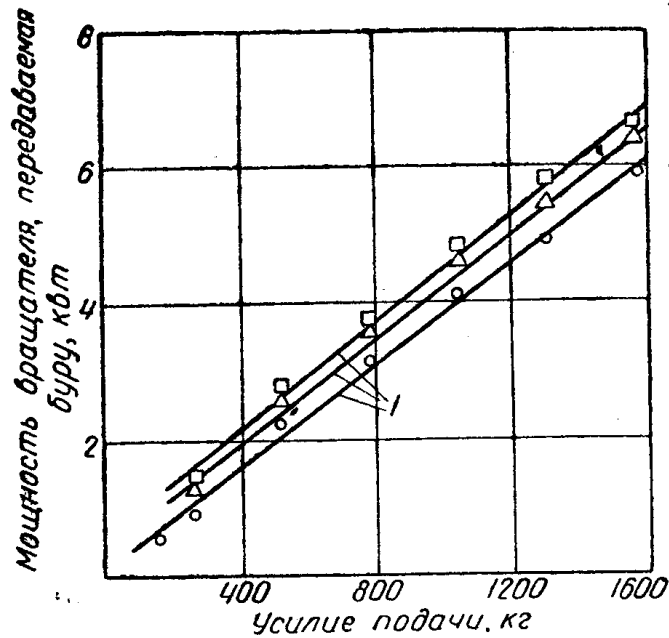


Рис. 11. Зависимость мощности вращателя, передаваемой буру, от усилия подачи: порода — песчаник  $f=8-12$ ; молоток ударного узла ОМ-506; 1 — коронка № 3;  $n_б=408$  об/мин;  $\circ$  — вращательное бурение; вращательно-ударное бурение:  $\Delta$  —  $p_M=4$  ати;  $\square$  —  $p_M=6$  ати.

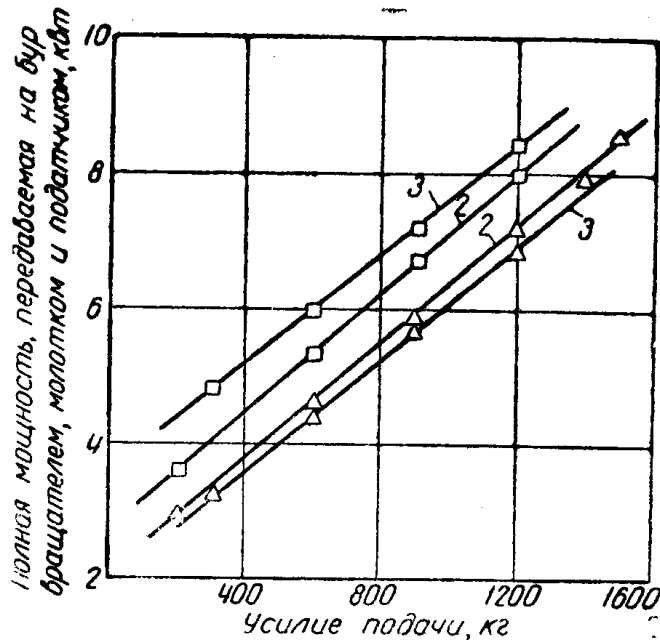


Рис. 12. Зависимость полной мощности, передаваемой на бур вращателем, молотком и податчиком, от усилия подачи при вращательно-ударном бурении: порода — песчаник  $f=8-12$ ; молоток RH-754; 2 — коронка № 2; 3 — коронка № 3;  $n_б=408$  об/мин;  $\Delta$  —  $p_M=4$  ати;  $\square$  —  $p_M=6$  ати.

Общая мощность, потребляемая вращателем, ударным узлом и податчиком (рис. 12), возрастает при увеличении усилия подачи. Увеличение давления воздуха, подводимого к ударному узлу, и повышение частоты ударов увеличивает общую потребляемую мощность. Это увеличение составляет от 15 до 40%. При наибольших скоростях бурения, полученных во время данного исследования,

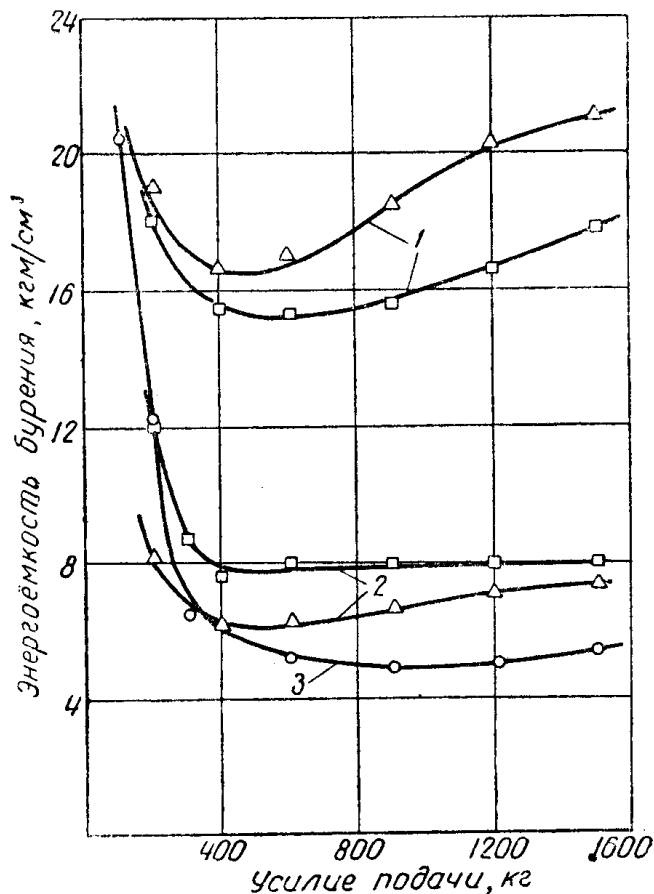


Рис. 13. Зависимость энергоемкости бурения от усилия подачи:

порода — песчаник  $f = 8-12$ ; молоток ОМ-506; 1 — коронка № 1; 2 — коронка № 2; 3 — коронка № 3;  $n_6 \parallel 196$  об/мин;  $\circ$  — вращательное бурение; вращательно-ударное бурение:  $\Delta$  —  $p_M = 4$  атм;  $\square$  —  $p_M = 6$  атм.

общие затраты мощности составляли 7—9 квт. Энергоемкость вращательно-ударного бурения, так же как и вращательного, в сильной мере зависит от геометрии бурового инструмента и усилия подачи (рис. 13). Минимальная энергоемкость  $7 \text{ кгм/см}^3$  была получена при применении коронки № 2 и усилиях подачи 1000—1200 кг. При этих же режимах бурения, но использовании коронки № 1 энергоемкость увеличивалась в 2—3 раза и достигала  $15-20 \text{ кгм/см}^3$ . Увеличение числа оборотов бура со 196 до 408 оборотов в минуту не приводило к существенному изменению энергоемкости процесса разрушения. Энергоемкость разрушения горных пород при вращательно-ударном бурении практически не превышает энергоемкость вращательного бурения.

Износостойкость буровых корончатых инструментов исследовалась при следующих режимах вращательно-ударного и вращательного бурения: число оборотов бура в минуту 196 и 408, усилия подачи 500, 750 и 1000 кг, ударный молоток РН-754, работающий на давлении воздуха 4 атм; удаление буровой мелочи производилось продувкой или промывкой. Бурение проводилось на наиболее распространенной углесопутствующей породе — песчанику крепостью  $f = 6-8$ .

За критерий износа была принята средняя ширина площадки затупления по задней грани главной режущей кромки. Форма

режущей грани коронки № 2 обеспечивала равномерный износ по всей длине главной режущей кромки рис. 1. Из рис. 14 видно, что износ коронки как при вращательно-ударном, так и вращательном бурении возрастает при увеличении усилия подачи и числа шпурометров. Причем интенсивность нарастания износа с увеличением числа шпурометров при вращательно-ударном бурении меньше, чем при вращательном. При увеличении износа инструмента скорость бурения уменьшается (рис. 15). При одинаковых усилиях подачи вращательно-ударное бурение обеспечивает значительно меньший износ коронки по сравнению с вращательным. При повышении усилия подачи износ коронки увеличивается как при вращательном, так и при вращательно-ударном бурении.

Если принять за допустимый износ режущей грани среднюю ширину площадки затупления 0,8—1,0 мм, когда уменьшение скорости бурения не превышает 20—30% от первоначальной, то коронка при вращательно-ударном бурении и усилии подачи 500—700 кг обеспечивает бурение 16—26 пог. м шпура. Коронки при вращательном бурении при этих же условиях обеспечивают бурение только 6—12 пог. м. Повышение стойкости коронки происходит соответственно на 118—116%. Аналогичные зависимости были выявлены при бурении с другими числами оборотов бура и различными способами удаления буровой мелочи из шпура.

На основании результатов исследования можно рекомендовать в качестве оптимальных следующие режимы вращательно-ударного бурения горных пород крепостью  $f$  от 6 до 10: усилие подачи 700—1200 кг, число оборотов бура 300—400 в минуту, мощность двигателя вращателя 4 квт, энергия удара 5—6 кгм при частоте ударов 3000—3500 в минуту. При бурении на этих режимах обеспечивается наибольшее преимущество вращательно-ударного бурения перед вращательным по скорости бурения, энергоемкости и износостойкости инструмента.

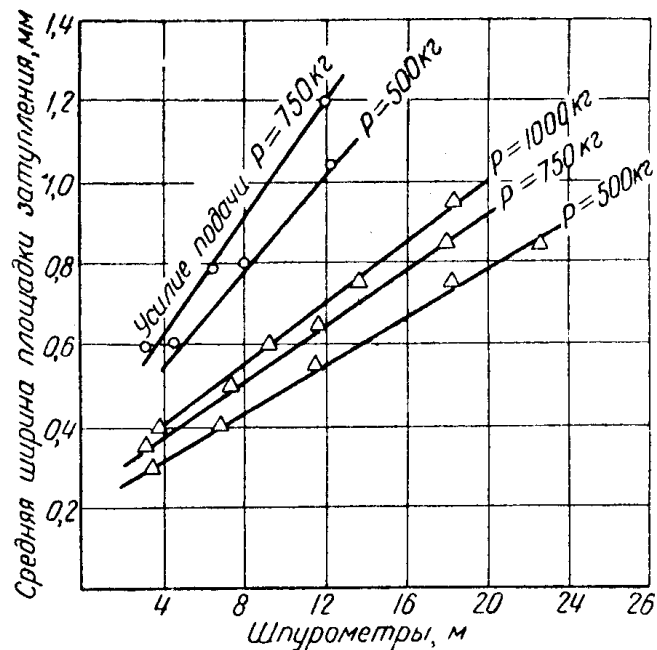


Рис. 14. Зависимость средней ширины площадки затупления коронки от способа бурения, усилия подачи и числа пробуренных шпурометров:

порода — песчаник  $f=6-8$ ; молоток RH-754; коронка № 2;  $n_б=408$  об/мин; удаление буровой мелочи промывкой; O — вращательное бурение; Δ — вращательно-ударное бурение;  $P_м=4$  ати.

Таблица 5

Способ бурения	Усилие подачи, кг	Скорость бурения		Затрачиваемая мощность, кВт	Износостойкость коронки, шпурометры	Энергоемкость бурения, кгм/см <sup>3</sup>
		мм/мин	%			
Ударно-поворотное бурение молотком RH-754, $p_M = 6 \text{ ати}$ . . . . .	100	550	100	2,2	75	16
Ударно-поворотное бурение молотком Т-10, $p_M = 6 \text{ ати}$	130	850	155	2,6	75	14
Вращательное бурение ЭБК-2м (с заводской настройкой) . . . . .	до 600	200	36	—	5	—
Вращательное бурение с промывкой (рекомендуемое)	до 1200	2800	510	4,5	10	7
Вращательно-ударное бурение с промывкой, RH-754 $p_M = 4 \text{ ати}$ , $n_6 = 408 \text{ об/мин}$	до 1200	3700	670	7	25	7

В табл. 5 дано сравнение различных способов бурения по основным показателям при крепости песчаника  $f = 6 \div 8$ . Основани-

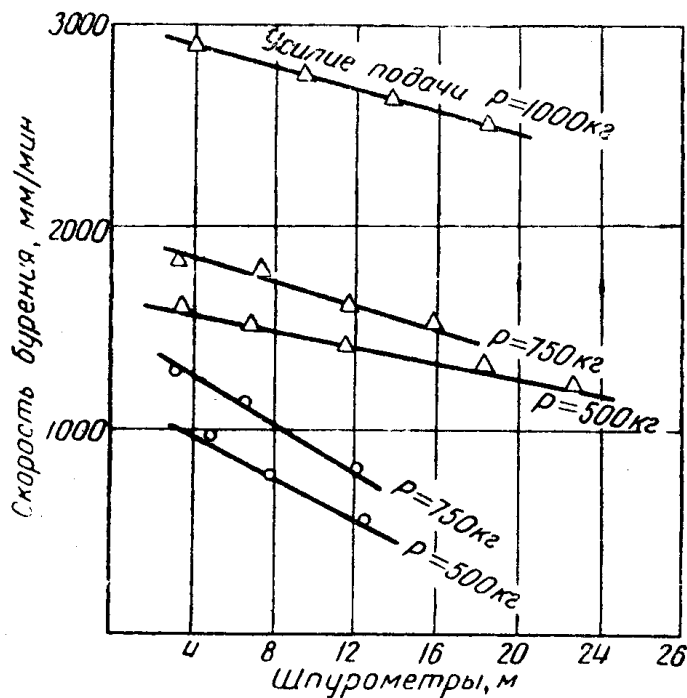


Рис. 15. Зависимость скорости бурения от способа бурения, усилия подачи и числа пробуренных шпурометров:

порода — песчаник  $f = 6 \div 8$ ; молоток RH-754; коронка № 2;  $n_6 = 408 \text{ об/мин}$ ; удаление буровой мелочи промывкой;  $\circ$  — вращательное бурение;  $\Delta$  — вращательно-ударное бурение;  $p_M = 4 \text{ ати}$ .

ем для составления таблицы послужили результаты наших исследований, а также результаты сравнительных испытаний пневматических бурильных молотков, изготовляемых в СССР и за границей [7]. Последние проводились одновременно с исследованием вращательно-ударного бурения. Испытания выяснили, что наибольшую скорость бурения горных пород крепостью  $f$  от 6 до 12 могут обеспечить молотки типа RH-754 при работе с пневмоподдержками и Т-10, установленные на специальных податчиках. Данные по бурению молотками RH-754 и

Т-10, приведенные в табл. 5, характеризуют возможности современных бурильных молотков.

Согласно данным табл. 5, скорость бурения вращательно ударным способом в 4,5—6,7 раза больше скорости бурения пневматическими бурильными молотками и в 1,3 раза по сравнению со скоростью при вращательном бурении. По износостойкости инструмента вращательно-ударное бурение занимает промежуточное положение между ударно-поворотным и вращательным бурением. Энергоемкость вращательного и вращательно-ударного бурения одинакова и в 2 раза меньше, чем при ударно-поворотном бурении.

В табл. 6 приведены рекомендуемые технические характеристики бурильной машины вращательно-ударного действия, предназначенной для бурения шпуров при проведении подготовительных выработок по породам крепостью  $f = 6 \div 10$ .

Таблица 6

Техническая характеристика	Рекомендуемые параметры машины
Энергия удара, <i>кгм</i> . . . . .	3—5
Число ударов в минуту . . . . .	3000—3500
Крутящий момент на буре, <i>кгсм</i> . . . . .	1500—2000
Число оборотов бура в минуту . . . . .	300—400
Усилие подачи, <i>кг</i> . . . . .	до 1200
Длина подачи (глубина шпура), <i>м</i> . . . . .	2,5—3,0
Средняя скорость бурения, <i>мм/мин</i> , коронкой $\varnothing 41$ мм: песчаник $f=8 \div 12$ , усилие подачи до 1000 <i>кг</i> (бурение с продувкой) . . . . .	3000
песчаник $f=6 \div 8$ , усилие подачи до 1200 <i>кг</i> (бурение с промывкой) . . . . .	3700
Давление сжатого воздуха, <i>ати</i> . . . . .	4—6
Допустимый износ коронки, <i>мм</i> . . . . .	1,0—1,2
Износостойкость коронки при бурении песчаника $f=6 \div 8$ , <i>пог. м шпура</i> . . . . .	25
Расход воды на промывку при давлении 5 <i>ати л/мин</i>	14
Расход воздуха на продувку при давлении 3—4 <i>ати, м<sup>3</sup>/мин</i> . . . . .	0,5—0,7

Следует отметить, что во всех известных нам конструкциях машин для вращательно-ударного бурения в качестве привода применяются лишь пневматические двигатели и пневматические бурильные молотки. Это обусловлено тем, что пневматические бурильные молотки в настоящее время являются наиболее работоспособными машинами ударного действия. Наличие одного пневматического вида энергии для ударного узла и вращателя упрощает конструкцию машины и ее энергоснабжение. Но как показали наши исследования для привода машин вращательно-ударного действия требуются значительные мощности — 7—9 квт. Расход воздуха для пневмодвигателя такой мощности составляет 8—10 м<sup>3</sup>/мин. Это усложнит и удорожит применение таких машин на современных угольных шахтах. Поэтому наряду с созданием машин вращательно-ударного действия с пневма-

тическим приводом целесообразно создать несколько опытных образцов машин с электрическим, а также и с комбинированным пневмо-электрическим приводом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Ф. Эпштейн. Теория бурения — резания горных пород твердыми сплавами. ГОНТИ, 1939.
  2. В. Г. Михайлов. Сверление шпуров. Металлургиздат, 1947.
  3. R. Jahn. Das Drehschlagbohren. „Glückauf“, No. 37/38, 1954, S. 1086—1093.
  4. F. Patzold. La foration vibree. „Revue de l'Industrie Minerale“, 1953, No. 602.
  5. W. D. Lacabanne and E. P. Pfeider. Rotary Percussion Blasthole Mashine may Revolutionize Drilling. „Mining Engineering“, September 1955, p. 850—855.
  6. В. G. Fish. Percussive—Rotary Drilling. „The mining Magazine, march 1956, p. 133—142.
  7. О. Д. Алимов, И. Г. Басов, П. А. Самойлов. О целесообразности применения высокочастотных пневматических бурильных молотков. Колыма, № 9, 1957.
-